

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412557

集横波与 SH 波一体的 Halbach 阵列换能器研究*

陈路安¹, 吕福在², 张鹏飞², 韩 烨³, 唐志峰¹

(1. 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院 杭州 310027; 2. 浙江大学机械工程学院 杭州 310027;
3. 管网集团(徐州)管道检验检测有限公司 徐州 221008)

摘要:为解决金属板超声体波测厚效率低下、导波扫查定量能力不足的问题,提出了一种集横波与水平剪切(SH)波为一体的 Halbach 阵列电磁超声换能器,在不增加体积的条件下,可同时实现横波和 SH0 阶导波的激励,兼具高精度定点测厚和区域缺陷扫查功能。通过仿真对磁体阵列和线圈排布结构进行了建模与优化,基于优化结果加工、装配了换能器原型。针对 SH 波扫查和横波测厚功能分别搭建了实验平台,实验结果表明该换能器能够有效识别粘附铁块尺寸大于 35 mm×10 mm×20 mm 的缺陷回波,横波测厚的平均误差小于 1.2%。该研究结合了超声体波定点测厚穿透强、准确度高以及 SH 波长距扫查、非频散的优势,提升了换能器的检测效率和功能性,具有良好的工业应用潜力。

关键词: 复合式换能器;线圈优化;Halbach 阵列;超声测厚;缺陷检测

中图分类号: TB553 TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on Halbach array transducer integrating shear wave and SH wave

Chen Lu'an¹, Lyu Fuzai², Zhang Pengfei², Han Ye³, Tang Zhifeng¹

(1. College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Pipe China (Xuzhou)
Pipeline Inspection Co., Ltd., Xuzhou 221008, China)

Abstract: To address the inefficiencies of ultrasonic bulk wave thickness measurement and insufficient quantitative capability of guided wave detection, a Halbach array electromagnetic ultrasonic transducer integrating shear wave and shear horizontal (SH) guided wave is proposed for metal plate detection. It has the ability to excite both shear-wave and SH0 guided wave without increasing the dimension of the transducer, which combines the functions of high-precision fixed-point thickness measurement and regional defect detection. The transducer prototype was modeled and optimized for magnet array and coil arrangement through finite element simulation, followed by manufacturing and assembly based on the optimized results. Experimental platforms were established for SH wave detection and shear wave thickness measurement function respectively. The experimental results show that the transducer can effectively identify the echoes caused by the iron block adhering to the sample when the size of the block is larger than 35 mm×10 mm×20 mm, and the average thickness measurement error is less than 1.2%. This study combines the deep penetration and high accuracy of ultrasonic bulk wave point thickness measurement with the long-range, non-dispersive scanning capability of SH waves, thereby enhancing the transducer's detection efficiency and functionality. The transducer shows significant potential for industrial applications.

Keywords: composite EMAT; coil optimization; Halbach array; ultrasonic thickness measurement; defect detection

0 引言

近年来,随着我国各行各业的蓬勃发展,建设施工的

规模不断扩大,对各类工业材料的需求也日益增加。金属板作为一种基础工业原材料被广泛用于船舶制造、电力行业、航空航天、能源储运等众多领域,但多数情况下,其工作环境复杂而恶劣,存在长时间的压力作用以及腐

蚀性介质的作用,易产生凹坑、裂纹、孔洞等缺陷,可能进一步导致各类事故,造成经济损失、人员伤亡,以及严重生态灾难^[1-2]。因此,对金属板类试件的无损检测提出了更高的要求。

当前对金属板类试件的无损检测主要采用超声、漏磁、磁粉和射线等技术。漏磁和磁粉检测均利用缺陷会使部分磁场从工件表面逸出的原理,但漏磁信号的幅值和波形易受环境影响,且粗糙表面会在检测信号中引入难以处理的噪声,而磁粉无法检测试件内部缺陷,在一定磁化方向下可能漏检^[3-4]。射线检测时,试件缺陷处会有更多射线通过,对应位置胶片产生更多曝光,但其检测成本较高,对人体有健康危害^[5]。

相比于上述检测技术,超声法在金属板类试件的检测中优势显著。超声检测技术主要分为体波检测和导波检测两类^[6]。体波检测主要是利用超声波在试件上下表面传播、反射的时间间隔实现厚度测量,分为横波、纵波两种模式,具有检测深度大、成本低、使用方便、速度快、对人体无害等优势^[3]。超声导波是受到波导边界约束限制的超声波,在板中主要包括 Lamb 波、水平剪切(shear horizontal, SH)波等。超声导波除了具备上述超声体波的优势以外,其仅在单点激励就能够实现长距离扫查检测。

超声技术根据激励机理又可分为压电、磁致伸缩和电磁超声等常见类型,采用压电和磁致伸缩原理激励超声需对试件预处理,并辅以耦合材料,检测效率低下,而电磁超声结构简单、无需耦合、可非接触式检测、检测效率高^[7],受到更为广泛的关注和研究。在体波方面,Zhang 等^[8]基于二维有限元模型对蝶形线圈电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)参数优化,并采用三个磁化方向相反的永磁体结构,使得信号幅值提升了 4.97 倍。Cai 等^[9]利用声场特性仿真优化了垂直剪切波 EMAT,并结合扇区扫描成像算法实现了高分辨率缺陷成像,信号强度提升了 102.08%。石文泽等^[10]面向高温、狭窄的检测环境提出了一种仅线圈式电磁超声技术,所研制的 EMAT 可持续检测 450℃ 高温铝合金,且二次底波信噪比不小于 16.86 dB。在导波方面,Xie 等^[11]针对单向瑞利波 EMAT 提出了一种变长度回折线圈的结构,有效抑制了旁瓣水平。Zhang 等^[12]研制了一种 EMAT,包含环形磁铁和提供径向电流的线圈,可以在铝板中实现全向 SH 波的激励和接收。Zhang 等^[13]针对磁体对数较少的周期性永磁体(periodic permanent magnet, PPM)EMAT 中存在的问题区域中心偏移问题进行研究,指出空间谱峰频偏移是造成上述问题的根本原因,并进一步指导 EMAT 激励参数选择及激励效率预测。

然而,超声体波检测和超声导波检测均存在各自不足,前者只能逐点检测,检测效率低下,后者定量能力不

足,且在换能器下方存在检测盲区,可造成漏检^[14]。对此,近几年已有学者尝试研究体波测厚和导波扫查一体化的 EMAT,以弥补两种技术的不足。本课题组先前研制了一种用于管道周向缺陷快速扫查的 EMAT,通过对螺旋线圈和回折线圈进行层叠设计和参数优化,实现了周向 Lamb 波和横波的同时激励^[15]。陈一博等^[16]提出了一种多通道体导一体 EMAT,可在一次检测中实现超声测厚、轴向 Lamb 波和周向 Lamb 波扫查。上述研究均采用了体波与 Lamb 波相结合的方案,但 Lamb 波具有多模态与频散特性,难以在试件中激励出单一纯净的模式,而 SH 波具有非频散特性,其 0 阶模态的群速度与相速度不随频率的改变而改变,利于信号的分析 and 解读,具备更好的检测与应用优势^[17-18]。此外,SH 波的各阶模态以面内位移为主,不易受与波导接触介质的影响^[19]。然而,SH 波换能器通常采用磁化方向间隔 180° 的磁铁阵列结构,偏置磁场的分布形式不同于 Lamb 波换能器,故上述研究设计无法直接地移植,且目前针对 SH 波复合式换能器的相关研究较少。

对此,本文提出了一种横波测厚与 SH 波扫查一体化的复合式 EMAT,可以在金属板中同时实现横波和 SH0 阶导波的激励。文章阐述了该换能器中永磁体和线圈的结构设计和换能机理,利用 COMSOL 软件对磁铁和线圈进行了建模与参数优化,加工、装配了换能器原型,最后通过实验验证了该换能器横波测厚功能和 SH 波扫查功能的有效性。

1 换能器结构与原理

EMAT 通常包含提供偏置磁场的永磁体、通入高频交变电流的线圈以及被测试件。如图 1 所示,线圈中的高频交变电流在试件表面感应出反向交变涡流,同时在偏置磁场的作用下产生洛伦兹力,该过程可以用式(1)表示^[9]:

$$\mathbf{F}_L = (\mathbf{B}_s + \mathbf{B}_d) \times \mathbf{J}_e \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_L$ 表示洛伦兹力; $\mathbf{B}_s$ 表示永磁体提供的静态偏置磁场; $\mathbf{B}_d$ 表示线圈产生的动态磁场; $\mathbf{J}_e$ 表示试件表面的感应涡流密度。该洛伦兹力使试件表面质点振动,进而形成在试件内传播的超声波^[20]。当被测试件为铁磁性材料时,还存在磁致伸缩效应,但由于其贡献相对较小,一般可以忽略^[21]。

对于 SH 波的激励和接收通常使用 PPM EMAT^[22-24],其包含磁体阵列、跑道型线圈和试件 3 部分。如图 2 所示,PPM 一般为两排,其提供的 z 方向偏置磁场垂直于线圈和试件平面,且任意相邻的两个磁体的磁化方向相反。进而, y 方向上相邻两个磁铁下方区域产生的洛伦兹力方向相同, x 方向上相邻两个磁铁下方区域

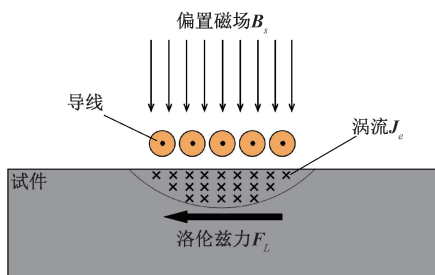


图 1 洛伦兹力激励原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of excitation based on Lorentz force principle

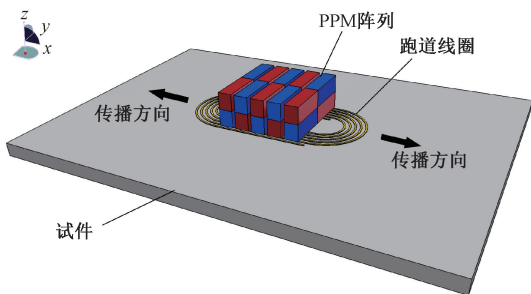


图 2 PPM-EMAT 的基本结构

Fig. 2 The basic structure of PPM-EMAT

产生的洛伦兹力方向相反。控制 x 方向上相邻两个磁铁中心距离为半波长,可以使激励的声场发生相长干涉,形成沿 x 轴方向传播的 SH 波。SH 波的接收则为上述激励的逆过程。

对于静态磁场,可以采用 Halbach 阵列代替上述传统的 PPM 结构进行优化。该结构最早由美国劳伦斯伯克利国家实验室的 Klaus Halbach 教授提出^[25],之后被用于核磁共振、直线电机、磁悬浮列车等领域,直至近年被用于 SH 波 EMAT。如图 3 所示, Halbach 阵列在原 PPM 结构中两个磁化方向间隔 180° 的永磁体之间,插入了水平磁化方向的磁铁,使每排的相邻两磁铁之间磁化方向的间隔变为 90° ,其作用是重新分配磁场,产生单侧高磁通量区域^[26]。图 4 所示为两种阵列的磁通密度模的归一化分布情况,相比于 PPM 结构, Halbach 结构提高了磁路效率,其在减弱上方磁场强度的同时增强了下方的磁场强度,故本文采用 Halbach 结构作为 EMAT 永磁体的排布方式。

SH 波在板类试件中存在多个对称与反对称模态,各模态频散特性取决于激励频率和被测试件的物理属性,其相速度和群速度频散方程可由 SH 波控制方程推导得到,分别如式 (2)、(3) 所示^[27-28]:

$$c_p = \frac{2c_T fd}{\sqrt{4(fd)^2 - n^2 c_T^2}} \quad (2)$$

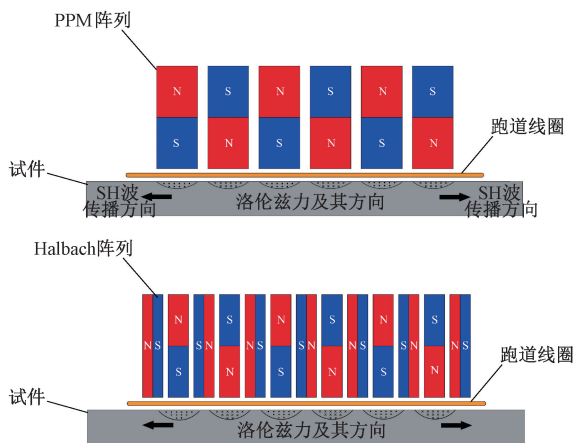
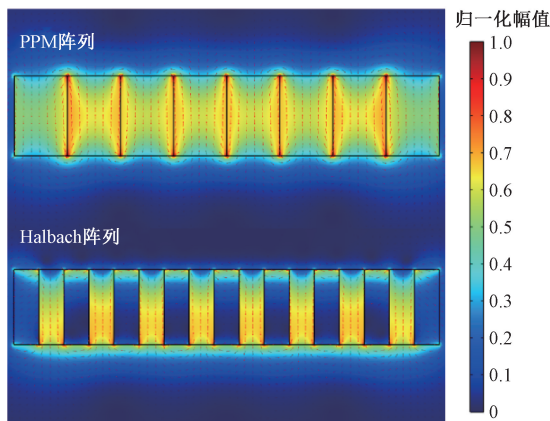
图 3 PPM-EMAT 和 Halbach-EMAT 的二维截面对比
Fig. 3 Comparison of 2D cross sections of PPM-EMAT and Halbach-EMAT

图 4 两种磁体阵列的磁通分布对比

Fig. 4 Comparison of magnetic flux distribution between two magnet arrays

$$c_g = c_T \sqrt{1 - \left(\frac{n/2}{fd/c_T} \right)^2} \quad (3)$$

式中: c_p 为相速度; c_g 为群速度; c_T 为试件中的横波波速; f 为激励频率; d 为被测试件厚度; n 为 SH 波阶数。当 n 取偶数时,对应的 SH 波为对称模态;当 n 取奇数时,对应的 SH 波为反对称模态。

以杨氏模量 210 GPa、泊松比 0.289、密度 7.82 g/cm^3 的钢板试件为例,绘制 SH 波频散曲线,结果如图 5 所示。由图可知, SH0 模态无频散特性,其相速度和群速度均为 3222.57 m/s ,与频厚积大小无关,除了 SH0 模态,其他各阶模态均存在截止频厚积,如式 (4) 所示^[27-28]:

$$(fd)_{\text{cut-off}} = \frac{nc_T}{2} \quad (4)$$

对于 1 阶模态,其截止频厚积为 $1.61 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$,选取频厚积小于该值的位置为工作点,可避免出现高阶模

态从而激励出纯净的SH0模态,利于信号的分析与解读。

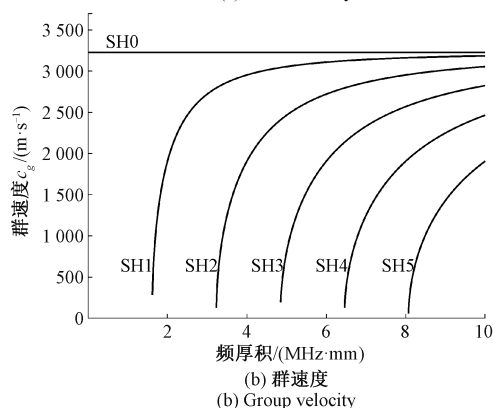
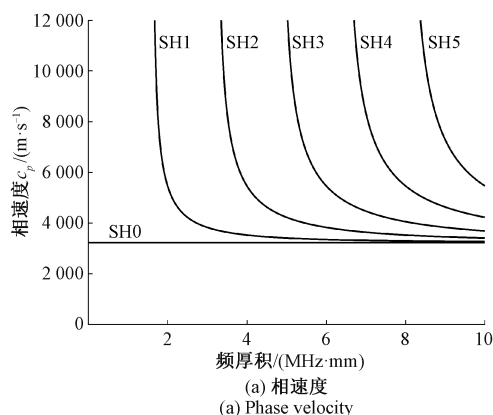


图5 SH波的相速度与群速度频散曲线

Fig. 5 Phase and group velocity dispersion curve of SH wave

对于横波的激励和接收,一般采用蝶形或螺旋形线圈,并搭配垂直于线圈平面的偏置磁场^[15]。在PPM或Halbach结构中,永磁体的磁化方向交替变换,增大了横波线圈排布的复杂性。为了使EMAT下方可产生一定面积的有效声场,同时尽可能避免噪声的引入与多模态现象的出现,本文设计了一种并列式回折线圈,如图6(a)所示。该线圈由两个参数相同的回折线圈对称、并排地放置,电流流向主要沿 y 方向,每匝线圈包含若干条导线,且每匝线圈可以分为左右两个线束,每个线束都处在一个磁化方向垂直于线圈平面的永磁体的正下方。如图6(b)所示,基于电磁感应原理, z 方向的偏置磁场与 y 方向的感应涡流在试件表面产生 x 方向的洛伦兹力,此外,相邻两个线束下方的偏置磁场方向与感应涡流方向均相反,故每个线束下方形成的横向振动方向均相同。

以单侧4个竖直方向磁化的磁体、4个线束的配置为例,其激励生成的横波在 $5.58\ \mu\text{s}$ 时刻的回波声场如图7所示。4个线束激励生成了4部分声场,因每部分声场在任意时刻的振动方向一致,4个声场相互融合,形成

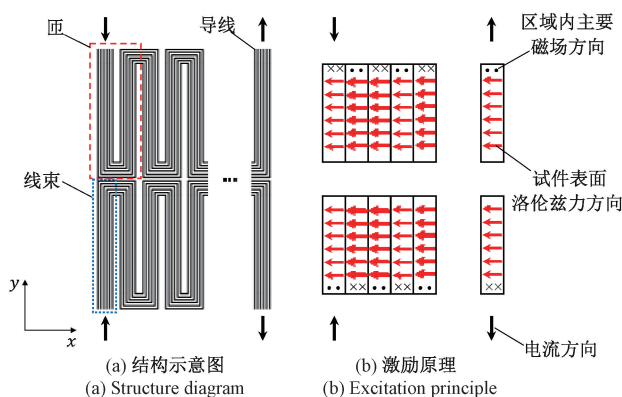


图6 并列式回折线圈结构及原理

Fig. 6 Structure and principle of symmetrical foldback coil

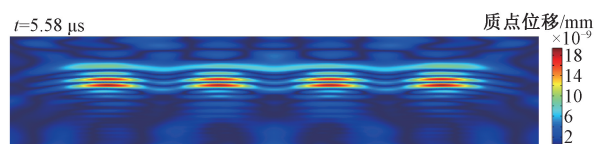


图7 并列式回折线圈声场分布

Fig. 7 Sound field distribution of symmetrical foldback coil

了能量较为集中、模态较为纯净的单个声场,具备较大的有效检测面积。

基于上述机理,本文所设计的EMAT包含Halbach永磁体阵列、跑道型线圈和并列式回折线圈。两种线圈层叠布置,彼此线路之间无连接,共用由Halbach永磁体阵列提供的静态偏置磁场。工作时,两种线圈分时复用,分别以不同的参数进行激励,从而在单次检测中实现横波测厚与SH波缺陷扫查一体化,提升EMAT的功能性与检测效率。

2 换能器参数分析及优化

2.1 换能器几何参数分析

本文所设计的EMAT结构俯视图如图8所示,现对图中结构及其几何参数做出定义:

1) 图中每个矩形代表永磁体,直线区域代表跑道型线圈直线部分,折线区域代表回折线圈主体部分;

2) z 方向磁化的永磁体为主磁铁, x 方向磁化的永磁体为副磁铁;

3) 在 y 方向上并排的两个主磁铁为一对,总对数记为 n ;为保证对称性,规定 x 方向上最外侧的磁铁均为副磁铁,故副磁铁对数为 $n+1$;

4) 为增加换能器空间利用率,假设各个磁铁在 x 方向上紧密排列,没有间隙;在 y 方向上留出大小为 s_L 的间隙,便于后期的磁体装配以及回折线圈的排布;

5) L_{total} 表示永磁体部分在 y 方向上的尺寸, W_{total} 表示永磁体部分在 x 方向上的尺寸, L 表示单块主磁铁在 y 方向上的尺寸, W 表示单块主磁铁在 x 方向上的尺寸, s_w 表示单块副磁铁在 x 方向上的尺寸, L_{coil1} 表示跑道线圈单侧总宽度(y 方向), W_{coil1} 表示跑道线圈直线部分的长度(x 方向); L_{coil2} 表示回折线圈每个线束的宽度(x 方向);

6) 在 x - y 平面之外的参数还有各个磁铁的高度, 设所有磁铁的高度均为 H 。

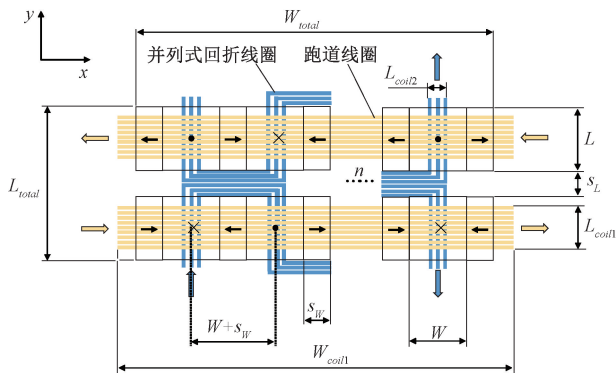


图8 换能器几何参数分析示意图

Fig. 8 Geometric parameter analysis diagram of transducer

由上述的分析可知, 如果暂且不考虑线宽、线间距、匝数等与线圈内部导线排布相关的参数, 那么此时的几何参数共计为 11 个。另外, 由于 SH 导波为区域扫查, 其能量集中程度不如体波, 因此在下面的参数选取中应优先考虑并保障 SH 波的收发性能。

2.2 换能器磁铁参数优化设计

如前面所述, SH1 模态的截止频厚积为 $1.61 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 。若被测试件厚度小于 10 mm , 选取 161 kHz 作为激励信号频率可避免出现高阶模态。此时对应的波长可以由 $c_p = \lambda \cdot f$ 的关系得到, 算得波长为 20 mm 。进而, 为了保证 SH 波声场的相长干涉, 相邻主磁铁中心之间的距离 ($W + s_w$) 也随之确定, 为半波长 10 mm 。

根据 PPM EMAT 的相关研究经验, 主磁铁对数 n 的增加可以增大声场主瓣振幅^[29-30], 但其对 EMAT 磁铁部分的总体横向尺寸影响较大, 关系式为:

$$W_{total} = nW + (n+1)s_w = n(W + s_w) + s_w \quad (5)$$

式中: $W + s_w$ 已确定为半波长 10 mm , 若限定换能器磁铁部分的总横向尺寸 W_{total} 小于 50 mm , 则 n 选取为 4。为保证磁铁内侧有足够空隙排布回折线圈, L_{coil2} 和 s_L 分别取 4 和 8 mm 。为了尽可能增大洛伦兹力激发区域并提高换能器的空间利用率, 令 $L_{race} = L$, $W_{race} = W_{total}$ 。

由于 s_L 大小已经选定, L 的取值将决定永磁体部分在 y 方向上的总宽度 L_{total} , 而 L_{total} 同时也是换能器的孔

径大小, 其值的大小与所激励 SH 波的声束角直接相关, 由式 (6) 给出^[31]:

$$\theta = 2\arcsin\left(\frac{0.442\lambda}{L_{total}}\right) \quad (6)$$

式中: θ 为所激励 SH 波的声束角; λ 为 SH 波的波长。

由式 (6) 可知, 随着 L_{total} 的增大, SH 波的声束角将减小, 基于该式绘制声束角 θ 与换能器孔径 L_{total} 的关系曲线, 如图 9 所示。过大的声束角将导致 SH 波声场的指向性与能量集中性较差, 不利于长距离传播与检测; 而声束角如果过小, 一方面会导致较低的扫查检测效率, 另一方面意味着需要较大的孔径来实现, 不利于换能器的小型化。因此, 本文所设计的换能器的 L 选择 20 mm , 此时孔径 L_{total} 为 48 mm , 代入式中得到对应的 SH 波声束角约为 21° 。

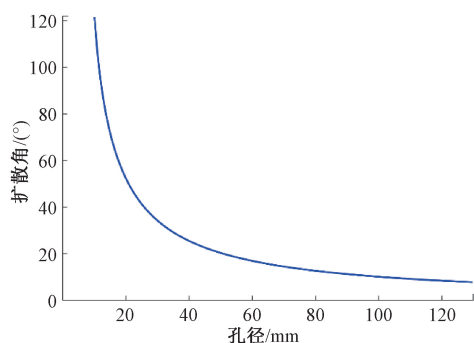


图9 换能器孔径对声束扩散角的影响

Fig. 9 Effect of transducer aperture on the beam spread

至此, 剩余的待选定参数为 W 、 s_w 和 H , 由于前文已经说明 W 和 s_w 的和须等于半波长, 不妨定义 $R_w = W / (W + s_w) = W / (0.5\lambda)$, 即主磁铁宽度与半波长的比值。下面通过仿真确定 R_w 和 H 的取值。

利用 COMSOL 5.6 建立三维仿真模型, 模型示意图如图 10 所示, 试件几何尺寸为 $450 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 试件四周的边界需设定为低反射边界, 以避免边界反射回波对仿真结果造成影响。

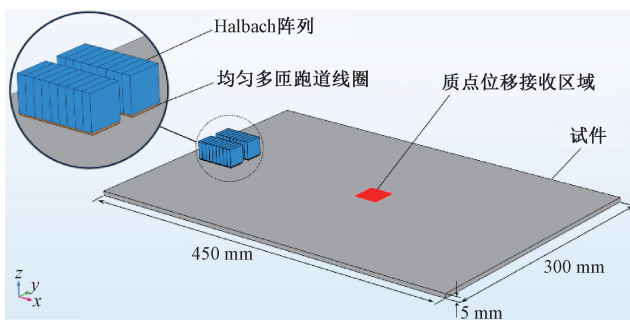


图10 磁铁参数优化仿真模型

Fig. 10 Simulation model for magnet parameter optimization

由于在 COMSOL 三维有限元仿真中构建准确的跑道线圈几何模型十分繁琐、不便,同时也会极大地增长模型计算时间和对计算机内存的需求,故部分学者采用均匀多匝模块来对跑道线圈进行一定的简化与替代^[20]。尽管该模块无法反映真实的线圈几何排布,没有考虑邻近效应、趋肤效应等线圈中的重要现象,但适用于针对磁铁参数的仿真研究,因此在 COMSOL 中绘制 2 个薄层并将其设定为均匀多匝线圈。

对于 Halbach 阵列永磁体,按照前文所选定的参数构建其几何结构,其中磁铁阵列高度 H 暂设为 15 mm。磁铁底面与线圈、线圈与试件表面距离均设为 1 mm。对于空气域,设定其体积远大于换能器体积以确保结果的准确性,同时调整空气电导率为 10 S/m 以增加模型求解收敛性。材料物理属性参数的设置如表 1 所示,仿真相关参数与边界条件设置如表 2 所示。

表 1 材料物理属性参数

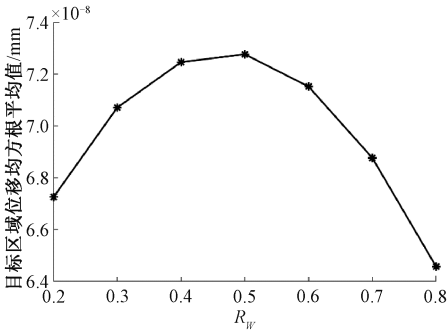
Table 1 Physical property parameters of materials				
属性参数	空气域	永磁体	线圈	试件
杨氏模量/GPa	-	-	-	210
泊松比	-	-	-	0.289
密度/(g·cm ⁻³)	-	-	-	7.82
电导率/(S·m ⁻¹)	10	7.14×10 ⁵	6×10 ⁷	6.44×10 ⁶
相对磁导率	1	-	1	2419
剩磁密度模/T	-	1.44	-	-

表 2 三维频域仿真参数与边界条件

Table 2 Parameters and boundary conditions of 3D frequency domain simulation	
参数或条件	值、类型或位置
激励频率/kHz	161
均匀多匝	跑道线圈位置
体载荷	换能器下方试件区域
低反射边界	试件四周厚度截面
网格类型	自由四面体网格
换能器下试件网格最大单元/mm	0.8
剩余试件网格最大单元/mm	2
网格最大单元增长率	1.5

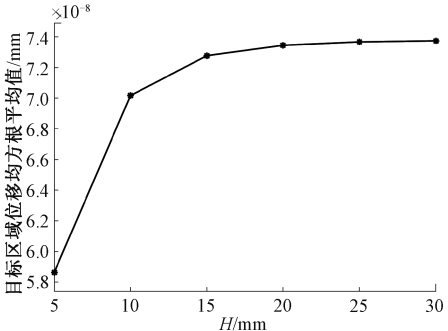
完成上述设置后,对 R_w 设置参数化扫描,扫描范围为 0.2~0.8,步长为 0.1,在选定频率 161 kHz 下运行频域仿真。选择换能器前方 200 mm 处 30 mm×30 mm 矩形区域内的平均位移作为指标,结果如图 11(a)所示,在 0.2~0.8 范围内,随着 R_w 的增大,目标区域平均位移先增大后减小,当 R_w 等于 0.5 时,目标区域平均位移达到

最大,因此 R_w 的值选取为 0.5。利用上述的仿真模型,固定 R_w 为 0.5,对 H 设置参数化扫描,扫描范围为 5~30 mm,步长为 5,目标区域平均位移结果如图 11(b),在该高度范围内,随着高度的增长,目标区域平均位移不断提高,增幅不断减小。高度每增长 5 mm,目标区域平均位移分别提高 19.7%、3.7%、0.9%、0.3%和 0.1%。当高度超过 20 mm 后,目标区域平均位移的增幅已远小于 1%,因此,综合考虑 SH 波振幅的强度和换能器的体积,选择 20 mm 作为磁体阵列的高度。至此,磁铁部分相关几何参数已全部确定,共计 11 个,如图 12 所示,其中磁体阵列的高度(20 mm)未在该俯视图中显示。



(a) R_w 与目标区域位移均方根的关系

(a) The relation between R_w and the root mean square of displacement in the target region



(b) H 与目标区域位移均方根的关系

(b) The relation between H and the root mean square of displacement in the target region

图 11 两种磁铁参数对换能器性能的影响

Fig. 11 The influence of two magnet parameters on the performance of the transducer

2.3 换能器线圈参数优化设计

本节对两种线圈内部导线排布相关的参数进行优化设计,主要包括跑道线圈的线宽 T 、线间距 G 和匝数 N ,以及并列式回折线圈的线宽 T_2 、线间距 G_2 和分裂数 N_2 ,如图 13 所示。由几何可知,上述 6 个参数与跑道线圈单侧总宽度 L_{coil1} 、回折线圈每个线束宽度 L_{coil2} 存在如式(7)和(8)所示的关系:

$$L_{coil1} = NT + (N - 1)G \tag{7}$$

$$L_{coil2} = N_2T_2 + (N_2 - 1)G_2 \tag{8}$$

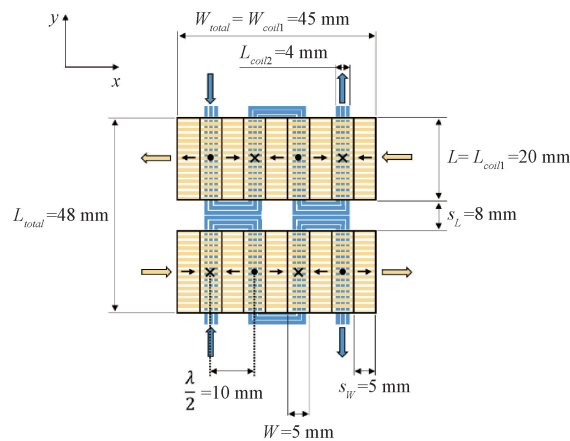


图 12 换能器磁铁部分几何参数优化结果
Fig. 12 Optimization results of geometry parameters of transducer magnet

式中: L_{coil1} 和 L_{coil2} 均已确定,故只需对 G 、 N 、 G_2 和 N_2 这 4 个参数进行选定即可。

在先前磁铁参数优化的仿真中,采用均匀多匝的模块对线圈部分进行简化和等效,但该模块忽略了线圈内的种种效应,无法准确反映线圈电阻、电感等阻抗相关参数,故无法使用该模块对线圈相关参数做出准确且有意义的优化。因此,本节采用二维有限元仿真对两种线圈的排布参数进行分析与研究。

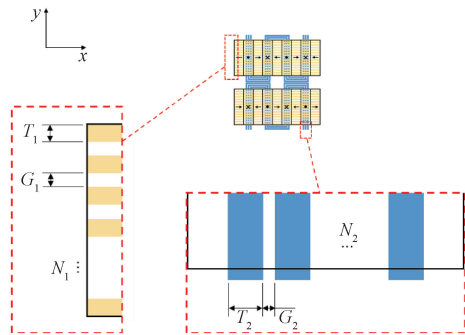


图 13 线圈内部参数示意图
Fig. 13 Diagram of coil internal parameters

跑道线圈二维仿真模型在 $y-z$ 平面上进行研究,如图 14 所示,包含磁铁阵列、跑道线圈和试件。其中线圈采用双层跑道线圈以提高换能效率,单层铜线厚度和基材厚度由柔性电路板的实际加工规格给出,分别为 12 和 25 μm 。在仿真中添加电路物理场并设置电压源和内阻,从而模拟实际线圈激励。在电路物理场中设置两个串联的“外部 I vs. U”接口,以供左右两侧线圈接入。由于各匝线圈之间应相互串联,且左右两侧线圈电流方向需相反,故将左右两侧线圈分别定义为两个单导线线圈组,并按相反方向接入上述接口。

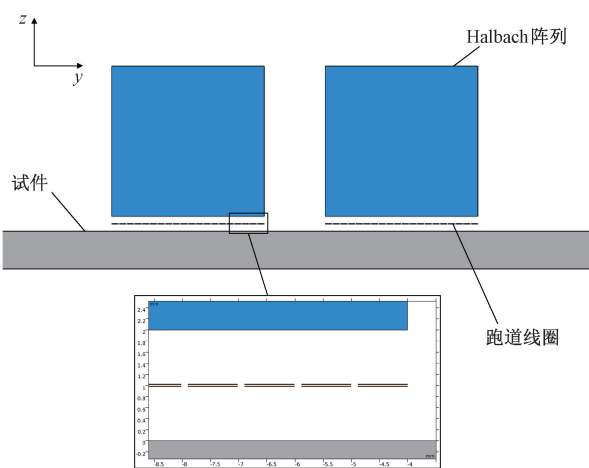


图 14 跑道线圈优化仿真模型
Fig. 14 Optimization simulation model for race track coil

电路模块整体连接示意图如图 15 所示,图中 R_{c1} 和 L_{c1} 分别表示模型左侧线圈的电阻和电感, R_{c2} 和 L_{c2} 分别表示模型右侧线圈的电阻和电感, U_s 表示电压源, R_s 表示内阻。定义电压源幅值为 1 200 V,内阻为 50 Ω 。计算跑道线圈总长度进而计算出单匝导线平均长度,将所有物理场的面外厚度均设置为该值,从而尽可能准确地反映跑道线圈阻抗。材料物理属性的设置与先前仿真一致,仿真相关参数与边界条件设置如表 3 所示。

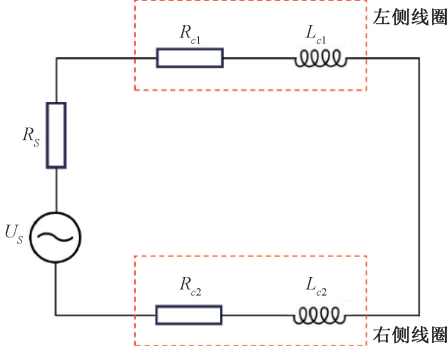


图 15 电路物理场节点连接示意图
Fig. 15 Circuit physical field nodes connection diagram

对于 SH 波的激励,偏置磁场方向、感应电流方向以及试件中粒子的主要振动方向分别沿空间中 3 个相互正交的方向,无法通过二维仿真模拟 SH 波的传播特性,故将仿真的优化指标定为换能器下方区域的试件表面洛伦兹力密度。

对 G 和 N 设置参数化扫描,其中 G 的扫描范围为 3~7 mil,步长为 1 mil, N 的扫描范围为 21~25,步长为 1,而后在 161 kHz 下运行频域仿真,得到的结果如图 16 所示。由图可知,在上述范围内,对于每一种匝数 N 配置,换能器下方产生的洛伦兹力密度随着线间距 G 的增加

表 3 跑道线圈仿真参数与边界条件

Table 3 Parameters and boundary conditions of the simulation model for race track coil

参数或条件	值、类型或位置
激励频率/kHz	161
激励电压/V	1 200
内阻/ Ω	50
单导线线圈组	跑道线圈位置
体载荷	试件表面 0.1 mm
低反射边界	试件两侧厚度截面
网格类型	自由三角形网格
试件网格细化区最大单元/mm	0.2
剩余试件网格最大单元/mm	1
网格最大单元增长率	1.3

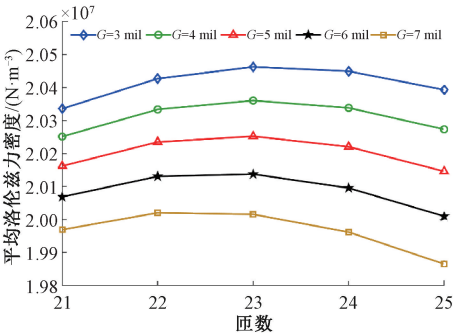


图 16 跑道线圈产生的平均洛伦兹力密度

Fig. 16 The average Lorentz force density generated by race track coil

而下降。这主要是由于跑道线圈的总体分布区域是固定的,在一定匝数 N 下,随着线间距 G 的增大,线圈的有效激励面积减小,进而降低了线圈产生的洛伦兹力密度。可以观察到对于任一线间距 G 的取值,随着匝数 N 的增加,换能器下方产生的洛伦兹力密度都呈现先增加后降低的趋势。其原因在于跑道线圈产生的总电流为单根导线中电流与匝数 N 的乘积,当匝数较小时,匝数提高对总电流的贡献占据主导;当匝数较大时继续提高匝数,线圈感抗增大,此时单根导线中电流的下降占据主导,造成跑道线圈产生的总电流减小,进而降低了换能效率。此外,可以观察到,在上述范围内,洛伦兹力密度最大处对应的线间距 G 为 3 mil,匝数 N 为 23,故将其选定为跑道线圈的参数配置,可以根据式 (7) 算得对应的线宽 T 约为 31.4 mil。

并列式回折线圈二维仿真模型在 $x-z$ 平面上进行研究,如图 17 所示,其建模思路及设置方式与上述跑道线圈基本相同。同样按照电流方向将 4 个线束分为两个部分,

进而分别定义为两个单导线线圈组,按相反方向接入电路模块。仿真相关参数与边界条件的具体设置如表 4 所示。

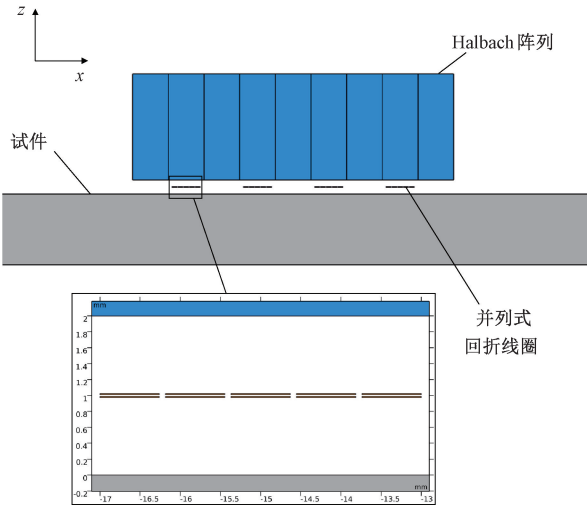


图 17 并列式回折线圈优化仿真模型

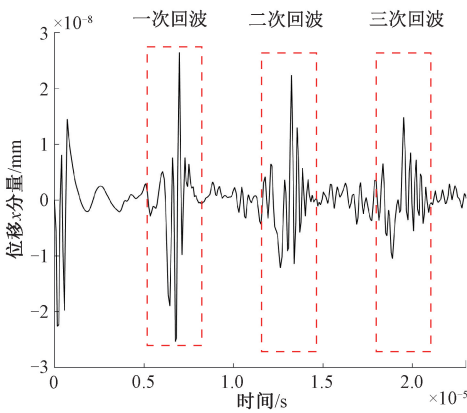
Fig. 17 Optimization simulation model for symmetrical foldback coil

表 4 回折线圈仿真参数与边界条件

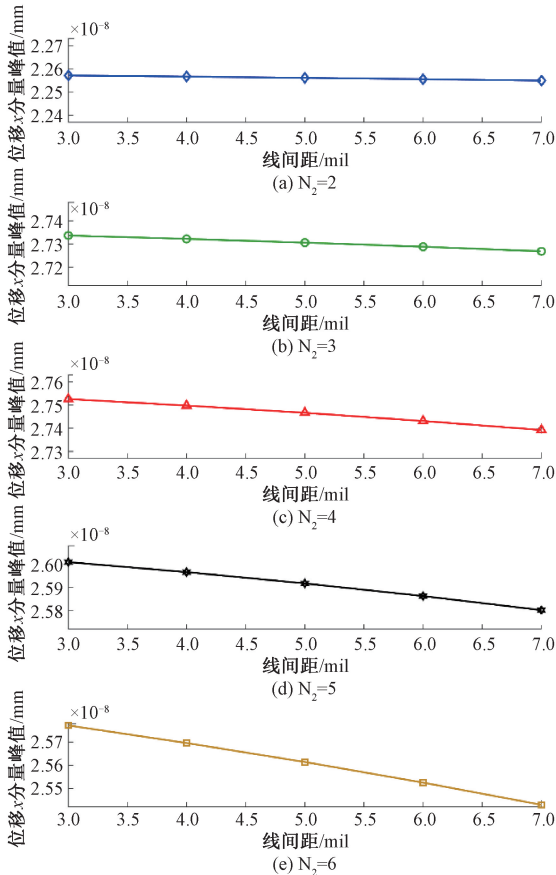
Table 4 Parameters and boundary conditions of the simulation model for symmetrical foldback coil

参数或条件	值、类型或位置
激励频率/MHz	3
激励信号周期	2
激励电压/V	1 200
内阻/ Ω	50
单导线线圈组	回折线圈位置
体载荷	试件表面 0.1 mm
低反射边界	试件两侧厚度截面
网格类型	自由三角形网格
试件网格细化区最大单元/mm	0.03
剩余试件网格最大单元/mm	0.08
网格最大单元增长率	1.3
瞬态求解器类型	广义 α
瞬态求解器时间步/s	2.22×10^{-8}

对 G_2 和 N_2 设置参数化扫描,其中 G_2 的扫描范围为 3~7 mil,步长为 1 mil, N_2 的扫描范围为 2~6,步长为 1。由于二维瞬态仿真可以准确反映横波的激励与传播,故设置电压源为 2 周期 3 MHz 交流信号,并运行瞬态仿真。在 4 个线束正下方的试件表面取 4 个点,绘制这 4 个点位位移平均值的时域图像,如图 18 所示,图中包含始波及多次反射回波。

图 18 试件表面质点位移 x 分量Fig. 18 The x component of the displacement of the particle on sample surface

进一步提取、绘制各个参数配置下的一次回波峰值,可以得到如图 19 所示的结果,图中横坐标为并列式回折线圈的线间距,纵坐标为位移 x 方向分量,因各个分裂数对应的位移 x 分量峰值差异较大,故将 5 种分裂数对应的数据分别绘制于 5 个分图之中,并控制各个分图的纵坐标尺度一致。

图 19 并列式回折线圈产生的质点位移 x 分量峰值

由图 19 可知,在研究的参数范围内,对于每一种分裂数 N_2 配置,位移 x 分量的峰值都随着线间距 G_2 的增大而减小,这是因为在一定分裂数 N_2 下,增大线间距 G_2 意味着减小线宽 T_2 ,导致线圈有效激励面积减少,进而降低了换能效率。可以观察到分裂数 N_2 越大,上述减小的趋势越为显著,该现象可以由式 (8) 解释,在式中令 T_2 关于 G_2 求导,得到式 (9):

$$\frac{dT_2}{dG_2} = \frac{1}{N_2} - 1 \quad (9)$$

由式 (9) 可知,对于相同的线间距 G_2 增量,分裂数 N_2 越大,线宽 T_2 的减小量越大,线圈有效激励面积损失更多,因此分图中的曲线下降速率与分裂数 N_2 大小呈正相关。此外,关注各个分图的纵坐标刻度,可以发现,5 个分图的曲线水平分别在 2.255、2.73、2.745、2.59 和 2.56 (单位为 10^{-8} mm) 上下,整体呈现先增长后下降的趋势,其与跑道线圈仿真结果中 5 条曲线先增后减的原理一致,不再重复赘述。最终,根据图中结果,将并列式回折线圈的参数选为位移 x 分量峰值最大的点对应的参数配置。该点对应的线间距 G_2 为 3 mil,分裂数 N_2 为 4,利用式 (8) 可得此时线宽 T_2 约为 37.1 mil。

3 换能器性能实验研究

为验证上述换能器结构的有效性以及仿真分析的准确性,本文对磁铁阵列和复合式线圈进行了加工与装配,并针对 SH 波缺陷扫查和横波测厚能力搭建了对应的实验平台进行实验研究。

本文提出的换能器的实物如图 20 所示。永磁体阵列采用 N52 钕铁硼磁铁,阵列包含共 18 个永磁体,每个永磁体尺寸均为 20 mm×5 mm×20 mm。换能器外壳通过 3D 打印方式制作,由于 Halbach 阵列在自然状态下不稳定,各个磁体之间存在较大的斥力,因此外壳的材料选用高韧性树脂,同时辅以胶粘的方式对永磁体阵列进行固定与装配。换能器线圈部分采用柔性印刷电路板加工制作而成,包含 4 层铜线层,自下而上依次为两层跑道线圈和两层并列式回折线圈,任意两铜线层之间为聚酰亚胺绝缘层,具体参数采用第 2 节中的优化结果。

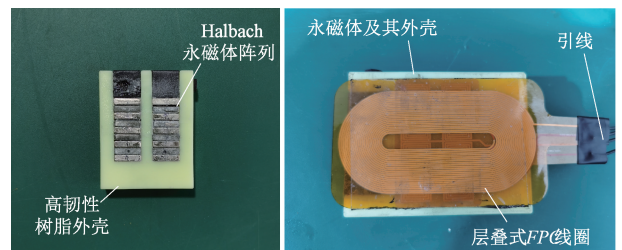


图 20 换能器实物图

Fig. 20 Physical drawing of the transducer

3.1 SH 波检测实验

首先搭建 SH 波检测实验平台,对 EMAT 的缺陷扫描功能进行实验验证。实验的激励设备采用杭州浙达精益机电技术股份有限公司的 MSGW30 超声导波检测仪。设备具有双输出通道,最高输出电压为 300 V,可以激励 25~200 kHz 的正弦波信号,包含脉冲回波和单发单收两种检测方式可供选择,支持 WIFI 无线连接和 TCP/IP,操作灵活便捷,整体结构紧凑便携,能够满足本次 SH 波检测实验的需求。此外实验平台还包括 Halbach 阵列换能器、上位机以及被测试件,平台整体结构如图 21 所示。

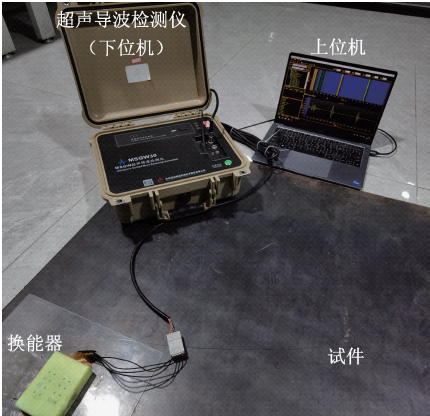


图 21 SH 波检测实验平台实物图

Fig. 21 Physical figure of the experimental platform for SH wave detection

被测试件采用 1 500 mm×1 500 mm×5 mm 的 Q235 钢板,在其表面粘附铁块以模拟伤损。本次实验共使用了 5 个不同尺寸的铁块,为了方便说明,对其进行 1~5 编号,对应的尺寸如表 5 所示。

表 5 试件表面粘附铁块参数

Table 5 Geometric parameters of the iron blocks glued to the surface of the sample

铁块编号	长度/mm	宽度/mm	高度/mm
1	30	5	10
2	35	10	20
3	35	20	10
4	85	20	10
5	110	20	10

铁块的具体固定位置以及对应的换能器放置位置如图 22 所示,铁块 1~5 已标出,换能器放置位置用带数字的方块标出,方块上的数字对应该位置检测的铁块编号。

对于 0 号位置放置的换能器,其激励的 SH 波朝上方

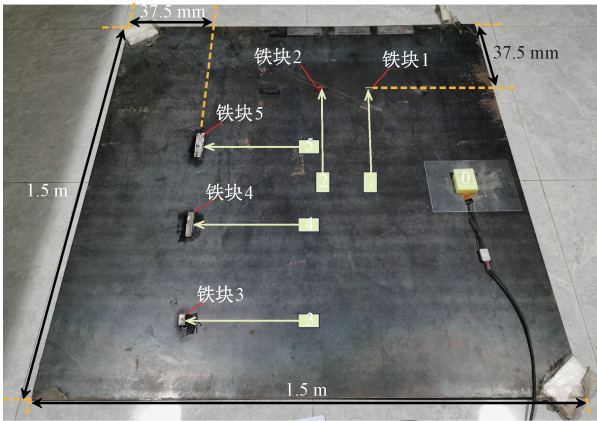


图 22 铁块与换能器放置位置示意图

Fig. 22 Schematic diagram of the placement of the iron block and the transducer

和下方传播,由于路径上无铁块,其测得的信号为无缺陷信号。考虑到换能器为双向激发,两个方向的 SH 波都会形成端面及缺陷反射信号,为了便于信号的解读与分析,将所有换能器的放置位置都设在钢板某一边的中轴线上,同时将铁块固定位置选在换能器与端面的中点处,从而尽可能令两个方向的端面回波或缺陷回波叠加出现在信号时域图像的同一位置。

将换能器依次放置于上述的 0~5 位置处,每次测试的输出信号均为 5 周期 161 kHz 的正弦波信号,测得的结果如图 23 所示,图中取第 1 次~第 2 次端面回波之间的范围作为信号判别、对比的区域,并设置各个分图的纵坐标幅值范围一致。

在图 23 中观察各个铁块检测结果在预期缺陷回波处的信号特征,发现由于 1 号铁块尺寸较小,其回波波包基本淹没在噪声之中,难以识别出明显的缺陷回波特征。在 2~5 号铁块的检测信号中可以观察到缺陷回波,且随着粘附铁块尺寸的增大,回波的幅值总体呈递增趋势,其中 4 号铁块和 5 号铁块对应的缺陷回波能量相对较大,其波形清晰明显,具有相对较高的信噪比。此外,还注意到图中各个分图的一次端面回波和二次端面回波信号清晰明显,但幅值大小不尽相同,其主要原因是每个端面回波信号依靠前后两个方向的 SH 波回波叠加组成,而被测试件为铁磁性材料,其引起的较大电磁吸附力使换能器的放置和移动较为困难,导致每次换能器放置的位置以及放置的角度存在少许偏离,影响了端面回波的叠加效果,进而造成每次测得的端面回波幅值存在差异。另一方面,铁块的粘附也对 SH 波能量产生一定的耗散作用,所粘附的铁块尺寸越大,透射的 SH 波能量相对越小,故图中呈现出端面回波幅值随铁块尺寸的增大而减小的大致趋势。上述现象并不对实验的分析造成影响,实验结果验证了所提出换能器具备良好的缺陷扫描功

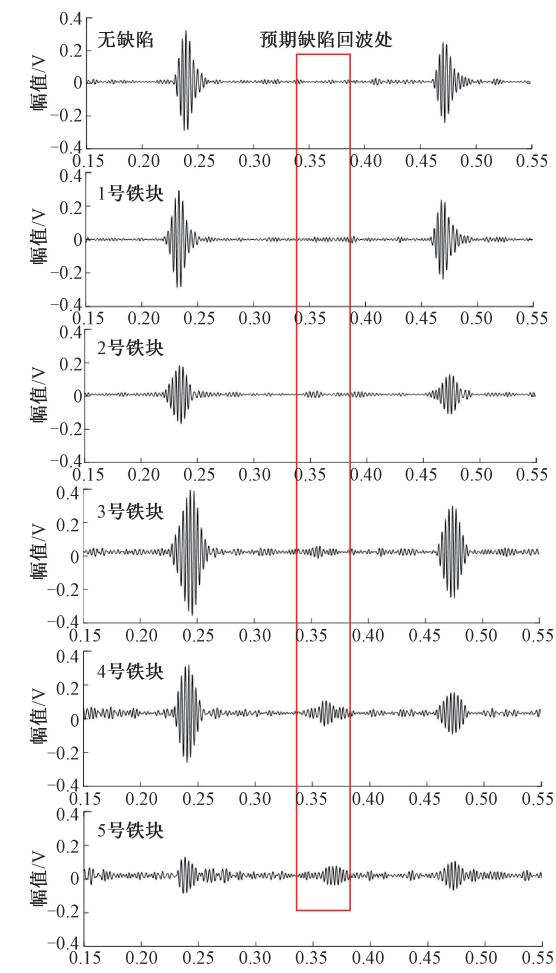


图 23 SH 波缺陷检测结果

Fig. 23 The result of SH wave defect detection

能,可以有效识别出尺寸大于 35 mm×10 mm×20 mm 的粘附铁块。

3.2 横波测厚实验

本文所提出换能器中的并列式回折线圈用于激励横波,对换能器下方区域进行厚度检测,从而反映被测件的健康状况,弥补 SH 导波扫查定量能力不足、存在盲区的问题。为了检验横波测厚的准确度,搭建了如图 24 所示的测厚实验平台,主要包括上位机、测厚下位机、前置放大器以及换能器。

测厚下位机采用的是杭州浙达精益机电技术股份有限公司的 MSGW TF-2.0 测厚系统,其激励信号类型为方波,具有 100 MHz 采样率,可提供最大 1 200 V_{pp} 的激励电压,激励频率 1~4 MHz 可调。

如图 25 所示,实验共采用 4 种被测 Q235 试块,试块 1~4 的厚度分别为 3.6、4、5 和 8 mm。在测厚时,为降低人为因素以及仪器带来的影响,对每一种厚度的试件各采集 10 组数据。

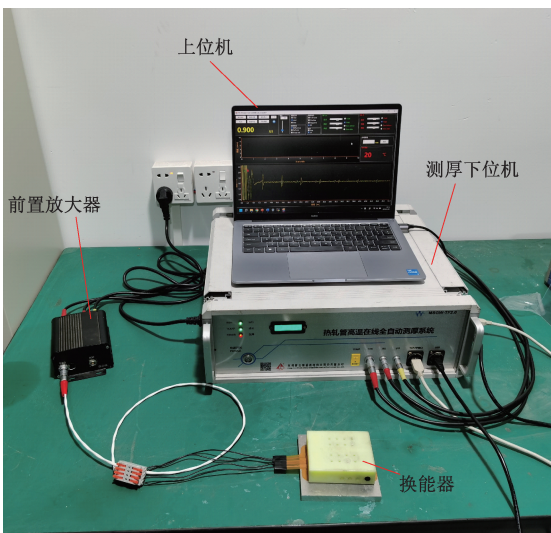


图 24 横波测厚实验平台实物图

Fig. 24 Physical figure of the experimental platform for thickness measurement

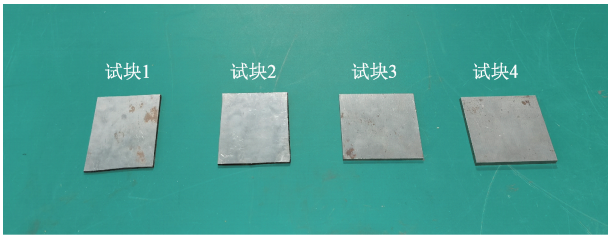


图 25 被测 Q235 试块

Fig. 25 Q235 test block

图 26 所示为 4 mm 试块的某次测厚信号,图中包含了始波与多次反射回波,反射回波中至少包含 6 个清晰可见的回波峰值。采用自相关算法计算试块的厚度,并与游标卡尺的测量值进行对比,相关结果如表 6 所示。对于每一种厚度的试块,该换能器测厚的平均误差均小于 1.2%。4 种厚度试块对应的换能器测厚平均误差绝对值分别为 0.030、0.024、0.058 和 0.040 mm。实验结果

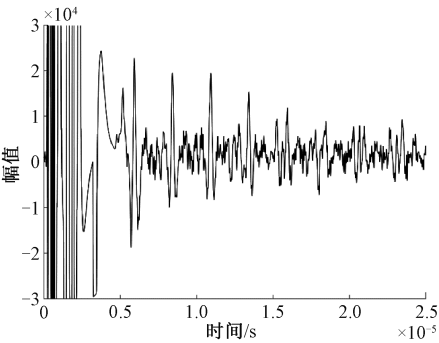


图 26 测厚信号

Fig. 26 Thickness detection signal

表 6 横波测厚误差统计结果

Table 6 Statistical results of thickness measurement error

试件 编号	游标卡尺测量值 /mm	横波测厚平均值 /mm	平均误差 /%
1	3.640	3.670	0.824
2	4.008	4.032	0.599
3	5.018	4.960	1.156
4	8.002	7.962	0.500

表明该换能器的横波测厚功能有效,且检测精度可以满足大部分工业需求。

4 结 论

针对金属板超声体波测厚效率低下、导波扫查定量能力不足的问题,本文提出了一种新型 EMAT 结构设计,可以在不增加 EMAT 体积的条件下,同时实现横波和 SH0 阶导波的激励,具备高精度定点测厚和区域缺陷扫查两种检测方式,形成技术优势互补。

研究采用 Halbach 磁体阵列和层叠线圈作为基本结构,利用仿真对磁体和线圈进行了参数优化,加工了 EMAT 原型,并针对两种检测功能进行了实验。实验结果表明,该 EMAT 能够有效识别粘附铁块尺寸大于 35 mm×10 mm×20 mm 的缺陷回波,横波测厚平均误差小于 1.2%,具备有效的测厚与扫查能力。相比于现有的换能器设计,本文提出的 EMAT 实现了功能性优化,结合了超声体波定点测厚穿透强、准确度高以及 SH0 阶导波长距扫查、非频散的技术优势,大幅提升了换能器的检测效率和功能性,具有良好的工业应用潜力。

当前研究存在一定的局限性,在有限元仿真的阶段,参数优化所关注的指标相对较为单一,在后续研究中将继续改进仿真模型,从而全面地研究和优化换能器的声场分布特性。此外,本文的研究主要针对金属板类试件,在未来的工作中,可以针对不同材质、厚度和曲率的试件以及多种缺陷损伤类型展开研究,从而进一步扩大换能器的检测应用范围,提升换能器在不同工作场景下的性能。

参考文献

[1] 卢超,郭伟,石文泽,等. 高温声学检测技术的发展、应用与挑战[J]. 振动. 测试与诊断,2024,44(1):1-10,193.

LU CH, GUO W, SHI W Z, et al. Development, application and challenge of high temperature acoustic testing technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 1-10,193.

[2] 曾杰伟,苏兰海,徐立坪,等. 逆磁致伸缩效应钢板内应力检测技术研究[J]. 机械工程学报,2014,50(8):17-22.

ZENG J W, SU L H, XU L P, et al. Research on the stress measurement of steel plate based on inverse magnetostrictive effect [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 17-22.

[3] 杨鹏,黄松岭,赵伟. 在役大型储罐壁板无损检测技术[J]. 无损检测,2009,31(5):377-380,401.

YANG P, HUANG S L, ZHAO W. Nondestructive testing techniques for the wall of tank in service [J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(5): 377-380,401.

[4] 李志刚. 浅谈磁粉检测在压力容器检验中的应用[J]. 价值工程,2014,33(9):19-20.

LI ZH G. On application of magnetic powder detection in the pressure vessel inspection [J]. Value Engineering, 2014, 33(9): 19-20.

[5] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M, SONI P A. Advances and researches on non destructive testing: A review[J]. Materials Today: Proceedings. 2018, 5(2): 3690-3698.

[6] 许有昌,耿永健. 薄板超声波检测方法 & 工艺试验研究[J]. 机械制造与自动化,2012,41(02):72-74,88.

XU Y CH, GENG Y J. Ultrasonic testing for thin plate under 4 mm [J]. Machine Building & Automation, 2012, 41(02): 72-74,88.

[7] 张京军,刘敏,贾国平,等. 正交试验理论线聚焦电磁超声换能器优化设计[J]. 中国测试,2024,50(2):91-99.

ZHANG J J, LIU M, JIA G P, et al. Optimal design of line-focusing EMAT based on orthogonal test theory [J]. China Measurement & Test, 2024, 50(2): 91-99.

[8] ZHANG J J, LIU M, JIA X J, et al. Numerical study and optimal design of the butterfly coil EMAT for signal amplitude enhancement [J]. Sensors, 2022, 22 (13): 4985-5000.

[9] WANG J F, LU ZH SH, SUN Y H, et al. Research on sector scanning imaging technology of EMAT for through-hole defects in aluminium plates [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024:1-23.

[10] 石文泽,邵纬桑,卢超,等. 高温铝合金仅线圈式电磁超声检测方法研究 [J/OL]. 机械工程学报,1-13 [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240305.1500.004.html>.

- SHI W Z, SHAO W S, LU CH, et al. Study on coil-only electromagnetic ultrasonic testing method for high-temperature aluminum alloy [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-13 [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240305.1500.004.html>.
- [11] XIE Y O, LI J Y, HUANG P, et al. A novel design of window function modulated meander-line-coils EMATs for unidirectional Rayleigh waves generation and sidelobes suppression[J]. NDT & E International, 2021, 123: 102501-102511.
- [12] ZHANG Y H, LIU W L, LI N, et al. Design of a new type of omnidirectional shear-horizontal EMAT by the use of half-ring magnets and PCB technology [J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106465-106472.
- [13] ZHANG H, YIN X, MA L, et al. Excitation characteristics of circumferential SH guided waves in steel pipes generated by EMATs with few-cycle PPM [J]. Ultrasonics, 2024: 107271.
- [14] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
- HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [15] 唐志峰, 孙兴涛, 张鹏飞, 等. 集测厚与导波检测于一体的复合式电磁超声换能器研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 98-109.
- TANG ZH F, SUN X T, ZHANG P F, et al. Research on composite electromagnetic ultrasonic transducer integrating thickness measurement and guided wave detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 98-109.
- [16] 陈一博, 杨理践, 高松巍, 等. 多通道体导一体电磁超声换能器的优化设计[J]. 无损检测, 2022, 44(5): 33-37.
- CHEN Y B, YANG L J, GAO S W, et al. Optimal design of multi-channel integrated body-guided electromagnetic ultrasonic transducer [J]. Nondestructive Testing, 2022, 44(5): 33-37.
- [17] RIBICHINI R, CEGLA F, NAGY P B, et al. Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2011, 58(12): 2571-2581.
- [18] LIU Y, WU B, ZHANG J, et al. Excitation of odd harmonics of SH0 mode ultrasonic guided waves using magnetostriction-based EMAT: Theoretical modeling[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2024, 35(3): 119-144.
- [19] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(2): 611-625.
- [20] WANG SH J, MA Z J, LI Y Q, et al. 3-D simulation for the acoustic field directivity of SH-wave EMATs [C]. 2017 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2017: 187-191.
- [21] RIBICHINI R, NAGY P B, OGI H. The impact of magnetostriction on the transduction of normal bias field EMATs[J]. NDT & E International, 2012, 51: 8-15.
- [22] VASILE C F, THOMPSON R B. Excitation of horizontally polarized shear elastic waves by electromagnetic transducers with periodic permanent magnets[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(4): 2583-2588.
- [23] HIRAO M, OGI H. An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection [J]. NDT&E International, 1999, 32(3): 127-132.
- [24] OGI H, GODA E, HIRAO M. Increase of efficiency of magnetostriction SH-wave electromagnetic acoustic transducer by angled bias field: Piezomagnetic theory and measurement[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(5B): 3020-3024.
- [25] 罗正豪, 柳霖, 井立兵. 新型 Halbach 阵列永磁电机谐波分析与优化[J]. 微特电机, 2017, 45(11): 19-22.
- LUO ZH H, LIU L, JING L B. Harmonic analysis and optimization of a novel halbach array permanent magnet motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2017, 45(11): 19-22.
- [26] SHANKAR S, BALASUBRAMANIAM K. Characterising the beam formation of SH waves using double-row Staggered Halbach EMAT configurations [J]. NDT & E International, 2021, 121: 102465-102475.
- [27] ROSE J L, NAGY P B. Ultrasonic waves in solid media[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(4): 1807-1808.

[28] PETCHER P A, DIXON S. Mode mixing in shear horizontal ultrasonic guided waves [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2017, 32(2): 113-132.

[29] 吴锐,石文泽,卢超,等. 航空不锈钢薄板电磁超声SH导波检测定量分析方法[J]. *航空学报*,2022,43(9): 735-748.

WU R, SHI W Z, LU CH, et al. Quantitative analysis method for electromagnetic ultrasonic SH guided wave detection of aerospace stainless steel sheet [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 735-748.

[30] MA Q Z, JIAO J P, HU P, et al. Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(2): 428-436.

[31] MCMILLAN R, HAMPSON R, TABATABAEIPOUR M, et al. Design and manufacture of an optimised side-shifted PPM EMAT array for use in mobile robotic localisation[J]. *Sensors*, 2023,23(4): 2012-2029.

作者简介



陈路安,2022 年于四川大学获得学士学位,现为浙江大学硕士研究生,主要研究方向为智能传感与检测技术。

E-mail:luanchen@zju.edu.cn

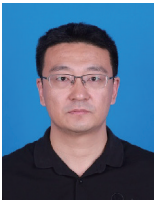
Chen Lu'an received his B.Sc. degree from Sichuan University in 2022. He is currently a master student at Zhejiang University. His main research interests include intelligent sensing and detection

technology.



E-mail:lfzlfz@zju.edu.cn

Lyu Fuzai (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 1990 from Zhejiang University, received his M.Sc. degree in 1997 from Zhejiang University, and received his Ph.D. degree in 2000 from Zhejiang University. He is currently an associate professor in Zhejiang University. His main research interests include mechatronics and advanced detection technology.



韩烨,2001 年于中国矿业大学获得学士学位,2011 年于中国石油大学(北京)获得硕士学位,2023 年于浙江大学获得博士学位,现为管网集团(徐州)管道检验检测有限公司副经理,正高级工程师,主要研究方向为特种设备检验检测。

E-mail:hanye02@pipechina.com.cn

Han Ye received his B.Sc. degree in 2001 from China University of Mining and Technology, received his M.Sc. degree in 2011 from China University of Petroleum (Beijing), and received his Ph.D. degree in 2023 from Zhejiang University. He is currently the deputy manager and professorate senior engineer of Pipe China (Xuzhou) Pipeline Inspection Co., Ltd. His main research interests include special equipment inspection and testing.