

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306785

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^{*}

邱锦川¹ 刘昭廷¹ 罗 伟² 段蕴琦² 伍剑波¹ 向天乐¹

(1. 四川大学机械工程学院 成都 610065; 2. 中石油西南油气田工程技术研究院 成都 610017)

摘 要:针对电磁超声换能器(EMAT)换能效率低、信噪比低和磁体内部超声波影响信号识别的问题,传统的处理方法包括添加铜箔背板或聚磁器。然而,铜箔背板在消除磁铁自振荡的同时减小了信号幅值;而已有的聚磁器又存在结构复杂,加工困难,成本较高等问题。文章提出了一种在永磁体与线圈之间添加梯形硅钢聚磁器的新型 EMAT 结构。梯形硅钢聚磁器结构简单,利用胶粘工艺制作。梯形聚磁器通过增加磁铁与线圈的距离来消除磁铁中的超声波,同时通过独特的梯形结构将磁铁的磁感线聚集于线圈作用区域,提高回波信号幅值。由于梯形硅钢聚磁器的尺寸对回波信号幅值有明显的影响,为了获取梯形硅钢聚磁器的最优尺寸,在 COMSOL 仿真平台中采用正交试验法对硅钢聚磁器的几何尺寸进行了优化设计。仿真和实验结果分别表明,含优化后梯形聚磁器 EMAT 的信号幅值较无背板 EMAT 提高约 60%,含优化后梯形聚磁器 EMAT 的信号幅值约为含 0.1 mm 铜箔背板 EMAT 的 6 倍。

关键词: 梯形硅钢聚磁器;正交试验;仿真优化;电磁超声测厚

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4017

Design of trapezoidal magnetic concentrator for electromagnetic ultrasonic transducer based on orthogonal test method

Qiu Jinchuan¹ Liu Zhaoting¹ Luo Wei² Duan Yunqi² Wu Jianbo¹ Xiang Tianle¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Engineering Technology
Research Institute of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610017, China)

Abstract: To address the challenges of low transduction efficiency, poor signal-to-noise ratio, and the influence of internal ultrasonic waves within magnets on signal detection in electromagnetic acoustic transducers (EMAT), conventional methods have employed copper foil backings or magnetic flux concentrators. However, while copper foil backings alleviate magnet resonance, they also reduce signal amplitude. On the other hand, existing flux concentrators suffer from complex structures, manufacturing difficulties, and high costs. This paper presents a novel EMAT design that incorporates a trapezoidal silicon steel concentrator positioned between the permanent magnet and the coil. The trapezoidal concentrator, with its simple structure fabricated using adhesive bonding techniques, effectively eliminates ultrasonic waves within the magnet by increasing the distance between the magnet and the coil. Moreover, its unique trapezoidal shape concentrates the magnetic flux lines into the coil's active region, thereby enhancing the amplitude of the echo signal. The optimal dimensions of the trapezoidal silicon steel concentrator, which significantly impact the echo signal's amplitude, were determined through orthogonal experimental design on the COMSOL simulation platform. The simulation and experimental results demonstrate that the signal amplitude of the EMAT with the optimized trapezoidal concentrator is approximately 60% higher compared to the EMAT without a backplate. Furthermore, the signal amplitude of the EMAT with the optimized trapezoidal concentrator is approximately six times greater than that of the EMAT with a 0.1 mm copper foil backplate.

Keywords: trapezoidal silicon steel magnetic concentrator; orthogonal experiment; simulation optimization; electromagnetic ultrasonic thickness measurement

0 引言

管道运输是石油天然气等重要能源最主要的运输方式。截至 2022 年底,我国油气管网建设规模已经超过 18 万公里,在运输油气资源的过程中,随着服役年龄的增加,管道受到外部环境的影响和内部化学物质的冲刷,会逐渐产生腐蚀、裂纹等损伤缺陷,可能引发管道泄漏、爆裂等严重隐患,造成巨大的经济损失及难以修复的环境破坏。

超声可用于板材、工件的高精度测厚,也可用于管道、压力容器等设备腐蚀程度的在役监测^[1-4]。与传统的压电超声相比,电磁超声检测具有无需耦合剂,对试件表面质量要求不高等优点,因此该技术在工业腐蚀监测领域具有巨大的应用前景^[5-7]。但是,EMAT 存在换能效率低,信噪比低等问题^[8]。此外,典型 EMAT 结构同时在试件和磁铁中产生超声波,影响了试件中超声回波的识别。这些都严重阻碍了 EMAT 的应用和推广。因此,对 EMAT 进行优化设计以提高换能效率十分重要。

近年来,国内外学者针对 EMAT 的优化设计进行了大量的研究。Jian 等^[9]提出可以利用层叠磁铁减少洛伦兹力在永磁体中的超声波。李素军等^[10]通过在磁铁与线圈中插入铜箔来消除磁铁中的超声波。Lunn 等^[11]在高温 EMAT 的永磁体和线圈中加入了 0.1 mm 的铜箔来消除永磁铁中的超声波。陈建伟等^[12]在永磁体和线圈之间添加了一种羰基铁粉背板,实验证明该背板能显著提高 EMAT 的信噪比。Liu 等^[13]通过在永磁体和线圈中添加锯齿形聚磁器来优化 EMAT 结构,提高了电磁超声导波的幅值。Ren 等^[14]提出使用 1 mm 厚,宽度小于磁铁宽度的硅钢背板来提高信号幅值。上述工作在消除磁铁内部超声波或者提高回波信号幅值等方面取得了一定的效果,但同时上述方法存在各种缺点。采用层叠磁铁无法消除磁滞伸缩机制在永磁铁中产生的超声波;铜箔的加入将导致信号幅值的降低;羰基铁粉背板、锯齿形聚磁器、1 mm 厚的硅钢背板存在成本较高、结构复杂、体积庞大或者加工制作困难等问题。因此,上述解决方案无法广泛应用于 EMAT 的设计和生产中。

针对上述问题,文章设计了一种包含梯形硅钢聚磁器的新型 EMAT。梯形硅钢聚磁器采用硅钢通过胶粘工艺制作,具有结构简单、易于加工和成本低的优点。梯形硅钢聚磁器通过增加永磁铁和线圈之间的距离来消除永磁铁中的超声波。更为重要的是,梯形硅钢聚磁器将由永磁铁被提高线圈和试件而分散的磁感线重新汇聚,在线圈的有效区域形成局部增大的磁场,进而提高换能效率,获得更大的超声回波信号和信噪比。此外,在聚磁器底面磁场 y 方向均匀性好,在增强 y 方向磁场的同时

不会增加 x 方向的分量,减少了激励时产生的其他模态波。由于梯形硅钢聚磁器的尺寸会显著影响超声回波信号幅值的改善效果,因此利用正交试验法对换能器中的梯形硅钢聚磁器的几何参数进行了优化设计,通过有限元仿真软件 COMSOL 对新型 EMAT 激励接收过程进行了模拟计算,以提高超声回波信号幅值为优化目标研究了梯形硅钢聚磁器与永磁体、线圈几何尺寸的最佳比例关系。最后根据仿真结果制作了不同类型的 EMAT 并搭建实验电路进行了实验验证。实验结果与仿真结果相吻合。

1 基本原理

典型 EMAT 结构如图 1(a) 所示,主要由永磁体,高频线圈,被测工件组成^[15-16]。但是线圈在试件表面产生感应涡流的同时也会在永磁体底面产生涡流,进而在永磁体内部形成超声波,这将干扰试件中回波信号的特征点提取。为了消除永磁体中的超声波,一种低成本的方法是在永磁体和线圈之间加入铜箔,如图 1(b) 所示。但是铜箔的加入将导致 EMAT 回波信号降低。本文所提出的含梯形硅钢聚磁器的新型 EMAT 如图 1(c) 所示。该新型 EMAT 不仅可以消除磁铁中的超声波,而且可以增强试件中的超声回波信号的幅值。

对于体波 EMAT 而言,洛伦兹力机制是在碳钢测厚中主要的作用机制^[17]。

基于洛伦兹力机制,激励传播过程可由麦克斯韦方程控制:

$$\begin{cases} \nabla H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \\ \nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ J = \eta E \\ B = \mu_0 H + M \\ \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 表示磁场, D 表示电通量密度, J 表示电流密度, E 表示电场, B 代表磁通密度, M 表示磁化强度, f 表示单位体积的力, σ_{ij} 表示应力张量, μ_0 表示自由空间的磁导率, η 表示电导率。

当在线圈中通入激励电流时,试件表面所受的洛伦兹力可表示为:

$$f_L = J_e \times B_s \quad (2)$$

其中, f_L 为洛伦兹力密度, J_e 为涡流密度, B_s 为永磁体产生的偏置磁通量密度。

当超声回波传播到试件表面时,试件表面粒子受到机械力的作用引发高频振荡进而产生感应电流 J_i 。

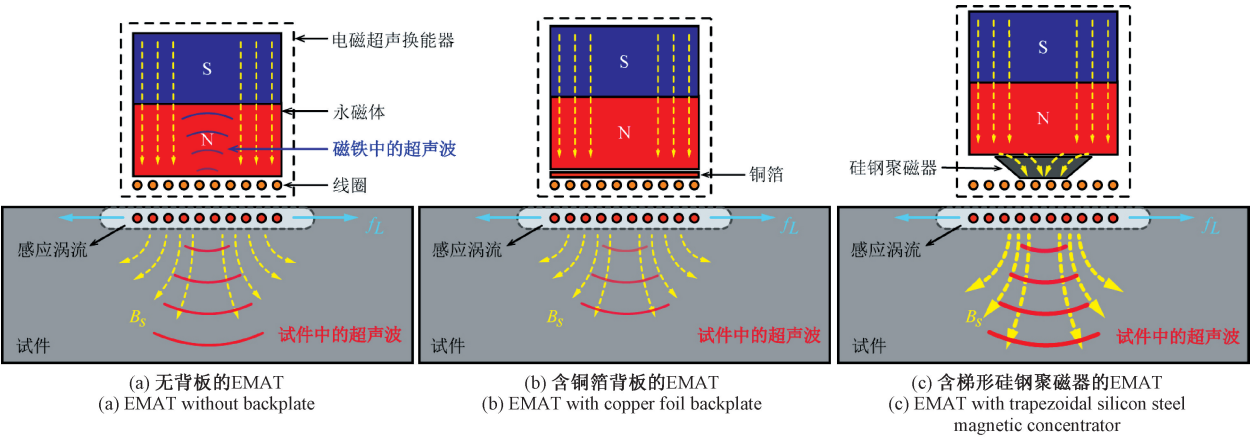


图 1 3 种 EMAT 结构原理
Fig. 1 Principle of three kinds of EMATs

$$J_i = \sigma (v \times B_s) \tag{3}$$

其中, σ 为试件材料的电导率, v 为质点振动速度。在超声波传回试件表面时, 感应涡流在线圈中激发出感应电压。在接收过程中, 试件中的涡流和线圈中的电流共同形成接收区域的磁场, 此时接收线圈和试件各区域的控制方程为:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\sigma}{s} \frac{\partial}{\partial t} \iint A ds = J_i \tag{4}$$

式中: A 为矢量磁位。

由式(2)可知, 增大涡流密度或增大静磁通量密度都能使超声波的能量增大, 涡流密度主要取决于激励电流的大小, 在实际中增大激励电流对激励电路有较高的要求, 且所需花费的成本较高。文中提出的新型 EMAT 通过在永磁体下方加入一块梯形硅钢聚磁器, 将磁感线汇聚到线圈的主要作用区域, 通过增大线圈作用区域的静磁通密度来增大激励出的超声波能量。同理, 由式(3)可知, 更大的磁场强度也能提高回波信号的接收效率, 获得更大的超声回波信号幅值。同时, 梯形硅钢聚磁器将磁铁与线圈的距离增大, 消除了永磁铁中的超声波。

2 仿真分析

为了研究梯形硅钢聚磁器对 EMAT 产生的影响, 在 COMSOL 中建立了含梯形硅钢聚磁器的 EMAT 模型, 如图 2 所示。为了获得梯形聚磁器的最佳尺寸, 文章针对聚磁器的几何参数(上底宽度 w_1 , 下底宽度 w_2 , 高 h)进行了优化设计, 硅钢聚磁器的电导率设置为 1.851 852 MS/m, 相对磁导率为 7 000。永磁体采用的材料为 N52 钕铁硼, 线圈的材料为铜, 试件的材料设置为 20 号钢。其余参数根据实际情况设定为常量值, 如表 1 所示。

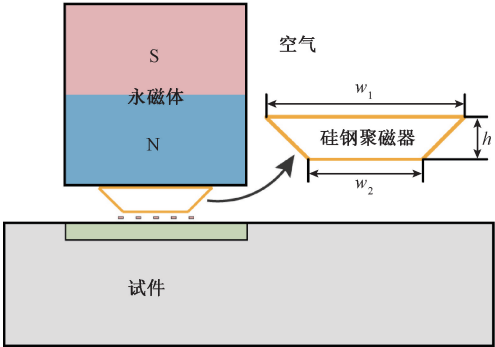


图 2 含梯形硅钢聚磁器的 EMAT 结构
Fig. 2 Structural diagram of the electromagnetic ultrasonic transducer with trapezoidal silicon steel

表 1 电磁超声传感单元几何建模参数
Table 1 Electromagnetic acoustic sensing unit geometry modeling parameters setting

几何模型	参数名称	数值	单位
永磁体	宽度	25	mm
	高度	25	mm
	剩余磁通量	1.4	T
	距线圈提高	0.2	mm
线圈	导线宽度	10	mil
	导线间距	8	mil
	厚度	35	μm
	距试件提高	0.2	mm
试件	导线数量	16	
	宽度	60	mm
	厚度	20	mm
	密度	7 850	Kg/m ³
	泊松比	0.3	
	杨氏模量	200	GPa
	电导率	8.41	MS/m

为了防止激励出的声波能量不集中,并减小由超声波传播时的衰减而导致的信号失真,在线圈中通入汉宁窗调制的正弦周期函数 $I(t)$ 为激励信号。激励信号公式如式(5)所示:

$$\begin{cases} I(t) = A\sin(2\pi f_0 t) \times (1 - \frac{\cos(2\pi f_0 t)}{n}), 0 < x \leq \frac{2n\pi}{\omega_0} \\ 0, x > \frac{2n\pi}{\omega_0} \end{cases}$$

(5)

其中, A 为激励信号幅值, f_0 为激励频率, n 为激励信号周期, ω_0 为激励信号角频率。

激励函数的参数设置如表 2 所示。

表 2 激励函数参数设置

Table 2 Excitation function parameter setting

参数名称	参数数值	参数单位
A	20	A
f_0	1	MHz
n	5	
ω_0	$2\pi f_0$	rad/s

在 COMSOL 中设置线圈的激励并绘制出函数图像,如图 3 所示。

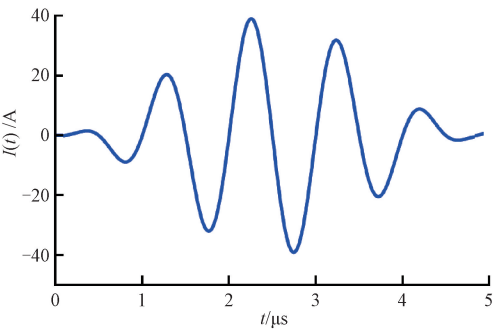


图 3 汉宁窗调制的正弦激励函数图

Fig. 3 Sinusoidal excitation function modulated by Hanning window

在 EMAT 传感单元网格划分中,试件是超声波传播的载体,需要对试件网格进行细化处理。因为感应涡流主要出现在试件的集肤深度层中,因此在试件集肤深度内的网格至少以集肤深度 δ 的 1/3 进行划分,集肤深度的计算公式如式(6)所示。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_0 \mu \varepsilon}}$$

(6)

其中, μ 为试件磁导率, ε 为试件电导率。

在本模型中,划分了宽度为 15 mm 的集肤深度区域进行细化。试件其余部分按照波长的 1/10 进行网格划分:超声波横波在 20 号钢中的传播速度约为 3 200 m/s,

20 号钢中横波波长计算公式为:

$$\lambda_h = \frac{v_h}{f_0}$$

(7)

其中, λ_h 为 20 号钢中横波波长, v_h 为横波在试件中的波速。

由式(7)计算可得,1 MHz 的激励信号下,横波在 20 号钢中的波长约为 0.003 2 m。

为了保证精度的同时,提高计算效率并节约计算资源。对其余部分的网格进行了如下划分:线圈按照线圈厚度的 1/3 进行自由四边形网格划分,永磁体采用最大单元大小 0.5 mm 细化进行自由四边形划分,空气域和聚磁器等采用预设较细化进行自由三角形划分,网格划分结果如图 4 所示,网格参数统计信息如表 3 所示。

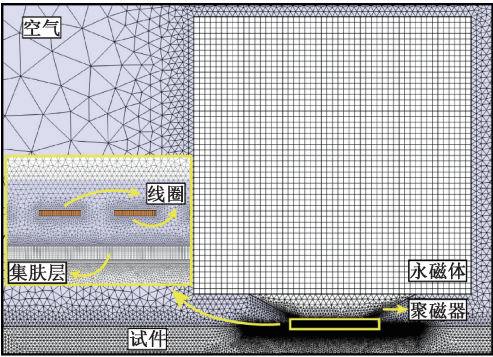


图 4 仿真模型网格划分图

Fig. 4 Simulation model mesh division diagram

表 3 网格划分参数

Table 3 Mesh partition parameter table

参数	数值
网格顶点	91 735~93 080
三角形	143 206~145 894
四边形	20 040
边单元	5 304
顶点单元	84
单元数	163 246~165 934
最小单元质量	0.444 1~0.453 6
平均单元质量	0.904 7~0.905 3
单元面积比	$1.278 \times 10^{-6} \sim 1.302 \times 10^{-6}$
网格面积	9 600 mm ²

EMAT 在换能过程中可能存在多种机制耦合的情况,而本文着重探究以洛伦兹力为主导作用的传导机制对低碳钢厚度测量的影响,忽略其他机制的作用^[18-20],因此多物理场设置为洛伦兹力耦合。

通过 COMSOL 有限元仿真求解含有铜箔背板 EMAT 和加入梯形硅钢聚磁器 EMAT 的磁场分布,如图 5 所示。可以看出,聚磁器及其下方的磁通密度高于铜箔背板产生的磁通密度。进一步地,绘制两种结构 EMAT 在试件

表面(图片底部虚线位置)的磁通密度随位置变化图,如图 6 所示。从图中可以看出,加入梯形硅钢聚磁器的永磁体在试件表面形成的磁场最大值约为 1.454 T;而铜箔背板因不具有导磁性,对永磁体产生的静磁场几乎不产生任何影响,其在试件表面产生的磁场最大值约为

0.812 T。由理论部分的推导可知,更大的磁场强度将会产生更强的超声波,进而获得更高的超声回波信号幅值。在聚磁器的下底边范围内的磁场最高,离开底边范围后磁场强度急剧衰减,在上底边范围外呈现二次衰减趋势。由此可见,硅钢聚磁器具有较强的磁场汇集作用。

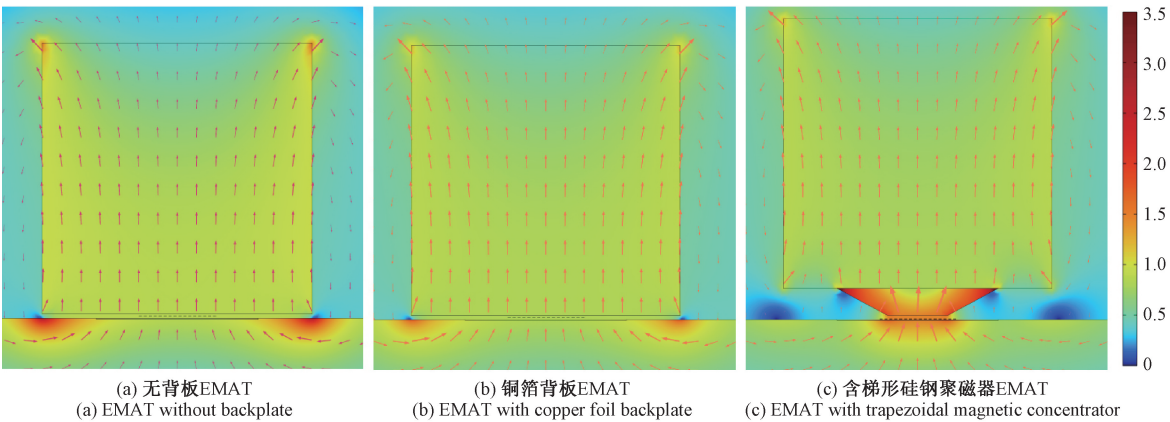


图 5 无背板 EMAT、含铜箔背板 EMAT 与含梯形硅钢 EMAT 磁通密度模分布图
Fig. 5 Magnetic flux density distribution between EMAT without backplane, copper foil backplate and trapezoidal magnetic concentrator

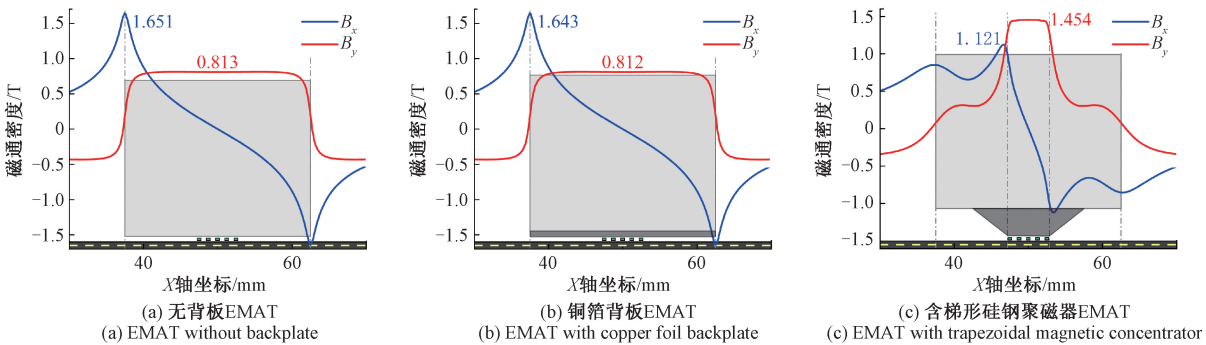


图 6 试件表面磁通密度随位置变化图
Fig. 6 Surface magnetic flux density with position of specimen

必须指出的是,梯形聚磁器虽然均能汇聚磁场,但梯形聚磁器的尺寸对磁场的汇集作用存在显著区别。为了研究聚磁器的最优几何尺寸,保持线圈宽度、磁铁宽度和磁铁高度不变,文章将梯形聚磁器上底宽度与永磁体宽度的比值(a_1),聚磁器下底宽度与线圈宽度的比值(a_2),聚磁器高度与永磁体高度的比值(a_3)选作优化参数。

为了提高仿真效率,采用正交试验法对上述优化参数进行仿真研究。基于 L25(5^3) 正交表,设计三因素五水平正交试验表,如表 4 所示。

根据表 4 设置的聚磁器的不同参数值,利用 COMSOL 有限元仿真软件分别模拟激励接收过程,并依次记录回波幅值。

表 4 梯形硅钢聚磁器正交试验设计
Table 4 Orthogonal test design table of trapezoidal silicon steel magnetic concentrators

水平	a_1	a_2	a_3
1	0.6	0.8	0.1
2	0.7	0.9	0.2
3	0.8	1.0	0.3
4	0.9	1.1	0.4
5	1.0	1.2	0.5

正交试验仿真结果如表 5 所示。从表中可以看出,在添加梯形硅钢聚磁器的 EMAT 的仿真结果中,最大回波幅值达到 19.8 mV。此外,使用相同的仿真参数对铜箔背板 EMAT 进行了仿真。结果表明,添加 0.1 mm 铜

箔的 EMAT 的回波信号仅为 2.5 mV。添加优化梯形聚磁器后 EMAT、无背板 EMAT 添加 0.1 mm 铜箔背板 EMAT 的回波信号对比图如图 7 所示。从图中可以看出,含优化后硅钢聚磁器 EMAT 较无背板 EMAT 回波幅值提高约 60%,添加了优化梯形硅钢聚磁器 EMAT 的回波信号的幅值约为添加铜箔背板 EMAT 的 8 倍。

表 5 正交试验仿真结果

Table 5 Orthogonal experimental simulation results				
编号	a_1	a_2	a_3	回波电压幅值/mV
1	0.6	0.8	0.1	19.8
2	0.6	0.9	0.3	14.3
3	0.6	1.0	0.5	7.0
4	0.6	1.1	0.2	14.2
5	0.6	1.2	0.4	7.5
6	0.7	0.8	0.5	8.1
7	0.7	0.9	0.2	18.5
8	0.7	1.0	0.4	9.5
9	0.7	1.1	0.1	15.9
10	0.7	1.2	0.3	10.3
11	0.8	0.8	0.4	10.3
12	0.8	0.9	0.1	16.6
13	0.8	1.0	0.3	12.1
14	0.8	1.1	0.5	4.8
15	0.8	1.2	0.2	13.1
16	0.9	0.8	0.3	12.8
17	0.9	0.9	0.5	5.4
18	0.9	1.0	0.2	13.6
19	0.9	1.1	0.4	6.4
20	0.9	1.2	0.1	13.1
21	1.0	0.8	0.2	12.4
22	1.0	0.9	0.4	6.3
23	1.0	1.0	0.1	11.8
24	1.0	1.1	0.3	7.5
25	1.0	1.2	0.5	3.1

表 6 正交试验极差分析

Table 6 Orthogonal test analysis table			
项	a_1	a_2	a_3
K1	62.8	63.4	77.2
K2	62.3	61.1	57
K3	56.9	54	28.4
K4	51.3	48.8	71.8
K5	41.1	47.1	40
$\overline{K1}$	12.56	12.68	15.44
$\overline{K2}$	12.46	12.22	11.4
$\overline{K3}$	11.38	10.8	5.68
$\overline{K4}$	10.26	9.76	14.36
$\overline{K5}$	8.22	9.42	8
R	4.34	3.26	9.76
因素每水平重复数	5	5	5
因素最佳水平	0.6	0.8	0.1
因素主次顺序	$a_3 - a_1 - a_2$		

综上所述,由仿真结果可知。含尺寸优化后的硅钢聚磁器 EMAT 较含 0.1 mm 铜箔背板 EMAT 的回波信号幅值有明显提升,而未经过尺寸优化的硅钢聚磁器 EMAT 回波信号幅值提升较小。

3 实验验证

为了验证仿真的有效性,依据正交试验结果制作了含优化梯形硅钢聚磁器 EMAT、含未优化梯形硅钢聚磁器 EMAT 和含 0.1 mm 铜箔背板 EMAT,并开展对比实验。

实验系统主要由电磁超声信号测量电路、EMAT、试块和示波器组成,如图 8 所示。电磁超声信号测量电路主要由激励电路、阻抗匹配电路和接收电路组成。由于电磁超声的换能效率较低,需要采用高压脉冲进行激励。控制电路采用 FPGA 芯片产生高频脉冲信号,但是由 FPGA 产生的信号功率无法满足驱动,因此需要对信号进行功率放大。UCC27321 能提供足够大的瞬态电流通过全桥逆变电路驱动 MOSFET 产生所需的高压脉冲。在本实验中线圈采用双层蝶形线圈,激励线圈与接收线圈独立分层排布,在 EMAT 中激励电路、接收电路与线圈之间存在阻抗不匹配的情况,会导致激励或接收能量被反

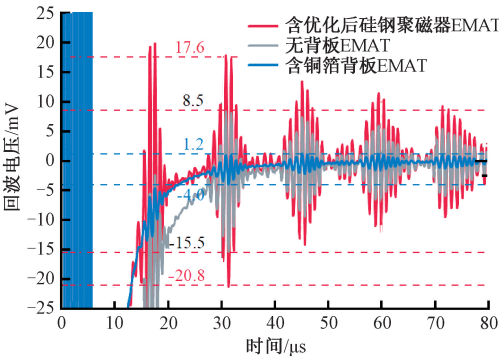


图 7 换能器回波信号仿真对比

Fig. 7 Comparative illustration of concentrators waveforms pre- and post-optimization

射。为了保证变量统一,实验所用的 EMAT 均并联电容的方式进行阻抗匹配。为了防止微弱的回波信号被噪声淹没,利用 AD8421 仪表放大电路通过差分的方式提取信号并抑制噪声。实验设计的 EMAT 中心频率为 2.5 MHz,利用 LT1568 窄带带通滤波电路可有效滤除高频和低频噪声。由两片 AD603 组成的可调增益放大电路可使信号动态可调。再次进行滤波后,通过示波器采集回波信号。

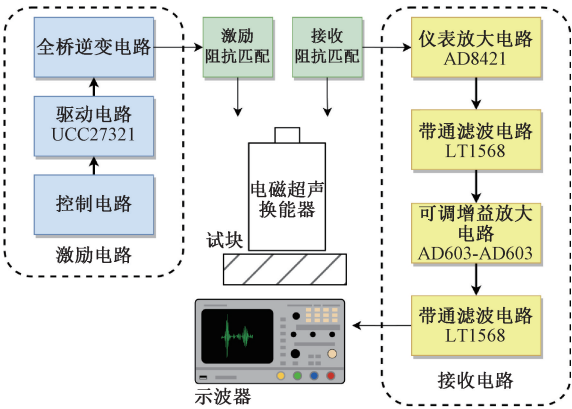


图 8 实验系统框图

Fig. 8 Block diagram of the experimental setup

实验中使用的试块厚度约为 20 mm,材料为 20 号钢;单极性正方体永磁体长宽高均为 25 mm;线圈主要作用区域的尺寸为 7 mm×10 mm。根据仿真结果制作了优化前后的硅钢聚磁器,分别对应最差尺寸组合(第 25 组)和最优尺寸组合(第 1 组)。最差尺寸组合的梯形硅钢聚磁器的上底宽度为 25 mm,下底宽度 8 mm,高度 12.5 mm;最优尺寸组合的梯形硅钢聚磁器的上底宽度为 15 mm,下底宽度 6.5 mm,高度 2.5 mm。硅钢聚磁器的材料为冷轧无取向硅钢,梯形聚磁器由多层硅钢片采用胶粘工艺制造。在添加了梯形聚磁器的 EMAT 中梯形聚磁器上表面(长边所在表面)与永磁体下表面几何中心重合并且紧密贴合放置。两种梯形聚磁器的实物如图 9 所示。对比实验系统如图 10 所示。

实验将采集到的波形经滤波放大电路后在示波器中显示,并将示波器采集到的波形数据导出并绘制波形对比图,如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,含优化后的梯形硅钢聚磁器 EMAT 的信号幅值约为 0.485 mV,含未优化聚磁器 EMAT 的信号幅值约为 0.145 mV,含铜箔背板 EMAT 信号幅值约为 0.11 mV,基准电压约为 0.03 mV。含优化后梯形聚磁器 EMAT 接收到的回波信号幅值较其余两组有明显地提升,含未优化梯形聚磁器 EMAT 的回波信号幅值略高于含 0.1 mm 铜箔背板 EMAT 回波幅值。

含优化后梯形聚磁器 EMAT 的信号幅值约为含

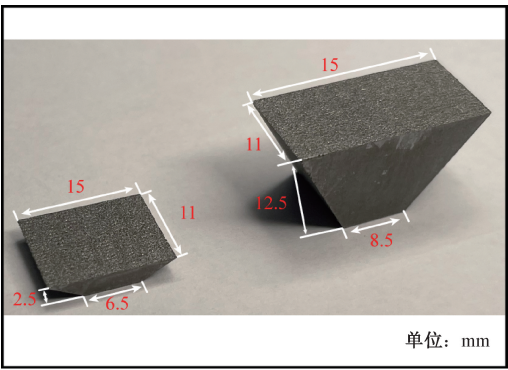


图 9 梯形硅钢聚磁器实物图

Fig. 9 Trapezoidal silicon steel magnetic concentrators

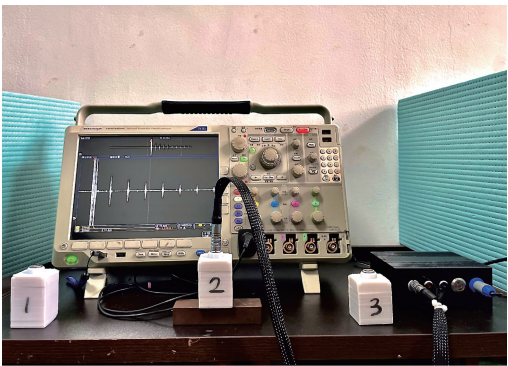


图 10 电磁超声换能器对比实验系统图

Fig. 10 Comparison experimental system diagram of electromagnetic ultrasonic transducer

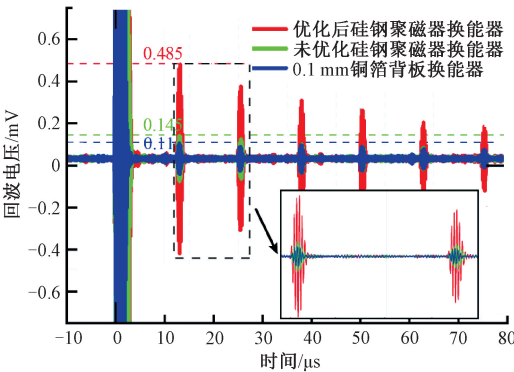


图 11 EMAT 回波信号对比

Fig. 11 Comparison diagram of transducer echo signal

0.1 mm 铜箔背板的 6 倍。这与仿真结果存在微小差异。原因是为了节约计算资源,提高仿真效率,在仿真中建立了二维模型,导致仿真结果略大于实验结果。因此,实验结果与仿真结果契合较好。

综上所述,在永磁体和线圈之间添加经过优化的梯形硅钢聚磁器,可以有效聚集单极性永磁体产生的磁场,

能明显提高换能效率。

4 结 论

文章设计了一种含梯形硅钢聚磁器 EMAT, 并采用正交试验法对梯形硅钢聚磁器的尺寸进行了优化。通过二维有限元分析, 得到了不同水平因素的仿真结果, 总结出各个因子的影响程度和最佳组合, 并开展实验验证, 结果表明:

1) 与不含背板的 EMAT 和含有铜箔 EMAT 相比, 添加优化梯形硅钢聚磁器 EMAT 能够有效提升超声回波信号的幅值。

2) 梯形硅钢聚磁器的尺寸对电磁超声信号的改善作用有显著影响。因此需要针对换能器结构进行几何尺寸优化才能显著提高换能效率。针对本文的磁铁和线圈尺寸而言, 最佳比例为上底宽度与永磁体宽度的比值为 0.6、下底宽度与线圈宽度的比值为 0.8、聚磁器高度与永磁体高度的比值为 0.1。

3) 仿真和实验结果分别表明, 含优化后梯形聚磁器 EMAT 的信号幅值较无背板 EMAT 提高约 60%, 含优化后梯形聚磁器 EMAT 的信号幅值约为含 0.1 mm 铜箔背板 EMAT 的 6 倍。

参考文献

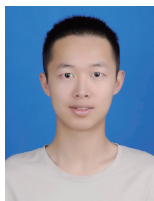
- [1] 邓勇, 曹敏, 赖治屹. 基于深度学习的天然气管道气体压力超声检测模式识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 176-183.
DENG Y, CAO M, LAI ZH Y. Ultrasonic detection pattern recognition method for natural gas pipeline gas pressure based on deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 176-183.
- [2] HUANG S, PENG L, WANG Q, et al. An opening profile recognition method for magnetic flux leakage signals of defect [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(6): 2229-2236.
- [3] SUN H, WANG S, HUANG S, et al. Oblique point-focusing shear-horizontal guided-wave electromagnetic acoustic transducer with variable PPM spacing[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(8): 1691-1700.
- [4] 张敏婧, 赵英亮, 王黎明, 等. 基于改进 STA/LTA 的高精度超声测厚方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10): 117-122.
ZHANG M J, ZHAO Y L, WANG L M, et al. Research on high precision ultrasonic thickness measurement

method based on improved [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(10): 117-122.

- [5] ZHANG J, LIU M, JIA X, et al. Numerical study and optimal design of the butterfly coil EMAT for signal amplitude enhancement [J]. Sensors, 2022, 22(13): 4985.
- [6] SUN H, URAYAMA R, UCHIMOTO T, et al. Small electromagnetic acoustic transducer with an enhanced unique magnet configuration [J]. NDT & E International, 2020, 110: 102205.
- [7] WANG S, HUANG S, ZHANG Y, et al. Multiphysics modeling of a Lorentz force-based meander coil electromagnetic acoustic transducer via steady-state and transient analyses [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6641-6651.
- [8] JIA X, OUYANG Q, ZHANG X. An improved design of the spiral-coil EMAT for enhancing the signal amplitude[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1106.
- [9] JIAN X, DIXON S, EDWARDS R, et al. Effect on ultrasonic generation of a backplate in electromagnetic acoustic transducers [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(2): 024909-024909-6.
- [10] 李素军, 郑阳, 郑晖, 等. 电磁超声传感器磁铁自激振荡消除方法的研究[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(3): 164-168.
LI S J, ZHENG Y, ZHENG H, et al. Study on the method of eliminating magnet self-oscillating in EMAT [J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(3): 164-168.
- [11] LUNN N, DIXON S, POTTER M. High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel [J]. NDT and E International, 2017, 89.
- [12] 陈建伟, 刘帅, 马健, 等. 一种高性能电磁超声传感器线圈背板及其优化设计[J]. 山东科学, 2022, 35(2): 70-78.
CHEN J W, LIU SH, MA J, et al. High-performance coil backplane for electromagnetic ultrasonic sensor and its optimization design [J]. Shandong Science, 2022, 35(2): 70-78.
- [13] LIU Z, LI A, ZHANG Y, et al. Development of a directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer for ultrasonic guided wave inspection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111859.
- [14] REN W, HE J, DIXON S, et al. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate[J].

- Sensors Actuators: A. Physical, 2018; 274:189-274:198.
- [15] 杨理践, 张佳, 邢燕好, 等. 一种管道中 $T(0,1)$ 模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 98-106.
- ZHANG L J, ZHANG J, XING Y H, et al. A unidirectional $T(0,1)$ mode electromagnetic acoustic transducer in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 98-106.
- [16] 郑浩, 周丽婷, 王湘明, 等. 电磁超声检测风机叶片缺陷的有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 24-29.
- ZHENG H, ZHOU L T, WANG X M, et al. Finite element simulation study on electromagnetic ultrasonic detection of wind turbine blade [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(23): 24-29.
- [17] SUN H, URAYAMA R, UCHIMOTO T, et al. Small electromagnetic acoustic transducer with an enhanced unique magnet configuration [J]. NDT and E International, 2020, 110:102205.
- [18] ISLA J, CEGLA F. Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(8): 1148-1160.
- [19] RIBICHINI R, CEGLA F, NAGY P B, et al. Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials[J]. Ndt & E International, 2012, 45(1): 32-38.
- [20] 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.

作者简介



邱锦川, 2023 年于四川大学获得机械设计制造及其自动化学士学位, 现为四川大学在读硕士, 主要研究方向为无损检测传感单元研制与应用。

E-mail: 763673469@qq.com

Qiu Jinchuan received his B. Sc. degree in Mechanical Design, Manufacturing, and Automation from Sichuan University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate in Sichuan University. His main research interests include the development and application of non-destructive testing sensor unit.



伍剑波 (通信作者), 2009 年于华中科技大学获得机械设计制造及其自动化学士学位, 2010 年于华中科技大学获得精密仪器及机械硕士学位, 2014 年于华中科技大学获得测试计量技术及仪器博士学位, 现为四川大学教授、博士生导师, 主要研究方向为涡流热成像检测、漏磁检测、巴克豪生噪声检测等。

E-mail: wujianbo@scu.edu.cn

Wu Jianbo (Corresponding author) received his B. Sc. degree in Mechanical Design, Manufacturing, and Automation from Huazhong University of Science and Technology in 2009, M. Sc. degree in Precision Instrument and Machinery from Huazhong University of Science and Technology in 2010 and Ph.D. degree in Measuring and Testing Technologies and Instruments from Huazhong University of Science and Technology in 2014, respectively. Now he is a professor and supervisor for Ph.D. student in Sichuan University. His main research interests include eddy current thermal imaging detection, magnetic flux leakage detection and Barkhausen noise detection.