

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107353

基于电磁超声换能器的兰姆波单一模态激励方法研究*

郭中会, 李松松, 何慧敏, 杨莹, 张琦

(大连海洋大学信息工程学院 大连 116023)

摘要:针对电磁超声换能器(EMAT)激发的超声兰姆波存在多模态的问题,提出一种通过换能器结构优化来激励兰姆波单一模态的方法。首先根据毕奥萨伐尔定律和麦克斯韦方程组研究了永磁体形状与磁场分布的关系,设计了一种新型可聚磁的“拱桥”式永磁体结构。然后对优化前后的 EMAT 进行了仿真实验和实测实验对比,实验结果表明:优化后的 EMAT 激励出兰姆波的 S0 模态幅值均有所增加,仿真与实测增加的幅值分别为优化前的 1.05 倍和 1.1 倍;而优化后的 A0 模态幅值均明显下降,分别为优化前的 0.22 倍和 0.12 倍;优化后的 S0 模态与 A0 模态的比值,也分别由优化前的 2.60 倍和 1.82 倍增加到 12.48 倍和 16.17 倍。由此可见,优化后的 EMAT 相比于优化前的普通 EMAT,能够很好地激励 S0 模态抑制 A0 模态,因此验证了新型 EMAT 可以有效激发兰姆波的单一 S0 模态。

关键词: EMAT; 单一模态; 兰姆波; 有限元仿真; 永磁体结构

中图分类号: TB552 TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Research on single mode excitation method of Lamb wave based on electromagnetic ultrasonic transducer

Guo Zhonghui, Li Songsong, He Huimin, Yang Ying, Zhang Qi

(School of information engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Aiming at the problem that the ultrasonic Lamb wave excited by the electromagnetic ultrasonic transducer (EMAT) has multiple modes, a method is proposed to excite a single mode of the Lamb wave by optimizing the structure of the transducer. First, according to Biot Savart's law and Maxwell's equations, the relationship between the shape of the permanent magnet and the magnetic field distribution is studied, and a new type of magnetizable "arch bridge" permanent magnet structure is designed. Then, the simulation experiment and the actual measurement experiment were performed on the EMAT before and after the optimization. The experimental results show that the S0 modal amplitudes of the Lamb wave excited by the EMAT after optimization are 1.05 and 1.1 before the optimization, and the A0 modal amplitudes are respectively It is 0.22 and 0.12 before optimization; the ratio of S0 mode to A0 mode is also increased from 2.60 and 1.82 before optimization to 12.48 and 16.17 respectively. It can be seen that, compared with the ordinary EMAT before optimization, the optimized EMAT can excite the S0 mode and suppress the A0 mode well, thus verifying that the new EMAT can effectively excite the single S0 mode of the Lamb wave.

Keywords: EMAT; single mode; guided wave; finite element simulation; permanent magnet structure

0 引言

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 作为一种新型换能器,因其工作时无需对试件表面进行预处理和添加耦合剂,被广泛应

用于无损检测领域^[1-3]。

然而电磁超声换能器存在换能效率低、激发的兰姆波存在多模态和频散现象的缺点。换能效率低使接收的回波信号小、易受噪声干扰;多模态现象使接收到的各模态回波信号复杂混乱,无法区分;频散现象使接收到的各模态回波信号发生重叠,降低检测能力^[4]。因此,国内

收稿日期:2021-01-09 Received Date: 2021-01-19

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51778104)、辽宁省教育厅科学研究项目(DL202005)资助



外学者主要从激发频率与线圈间距、板厚等关系和改变磁场方向两个方面对电磁超声换能器激发单一模态进行了研究。

从激发频率与线圈间距、板厚等关系方面:通过实验分析、有限元仿真分析以及数值计算相结合的方法,研究了频厚积与激发出单一模态的兰姆波的关系^[5];通过改变加载方式,研究按单节点加载与按厚度方向波结构进行加载激发单一模态的优劣性^[6];通过研究激发频率与线圈间距的关系,从理论和实验上研究不同线圈间距、不同激发频率下对不同模态的增强和抑制情况^[7-8]。

从改变磁场方向方面:为了产生水平方向的磁场进而激发单一 A0 模态兰姆波或增强兰姆波 A0 模态,多使用 U 型永磁铁结构^[9]、“SNS”结构复合永磁铁结构^[10]或将曲折线圈放置于永磁铁边缘方法^[11];为了产生垂直方向的磁场进而激发出单一 S0 模态兰姆波,多使用在待测件上下放置极性相反的双永磁铁结构^[12-13]。

综上所述,磁场分布和激发频率选择等是解决激发的兰姆波存在多模态问题的主要研究方向。本文提出通过设计一种新型换能器结构来激励兰姆波单一模态的新方法,根据毕奥萨伐尔定律和麦克斯韦方程研究磁场分布与激发单一模态 S0 兰姆波的关系,并构建永磁铁模型,研究永磁铁结构对与磁场分布的影响,设计出可激发单一 S0 模态兰姆波的永磁铁模型。

1 EMAT 单一 S0 模态兰姆波产生机理

EMAT 主要由金属线圈、永磁体、被测试件组成。永磁铁提供垂直方向的静磁场,通高频交流电的线圈提供交变磁场,磁场与电流相互作用在被测试件中产生超声兰姆波,如图 1 所示。

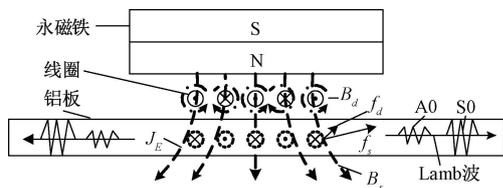


图 1 普通 EMAT 工作原理
Fig. 1 Principle of general EMAT

在非铁磁性材料中,EMAT 在试件内激发的超声兰姆波主要基于洛伦兹力机理,垂直于试件平面的洛伦兹力(分量)产生 A0 模态,平行于试件平面的洛伦兹力(分量)产生 S0 模态,如图 2 所示。因此,控制在时间内产生的洛伦兹力方向即可实现激发单一模态兰姆波。

根据麦克斯韦方程数学模型^[14-15]将 EMAT 在铝板中

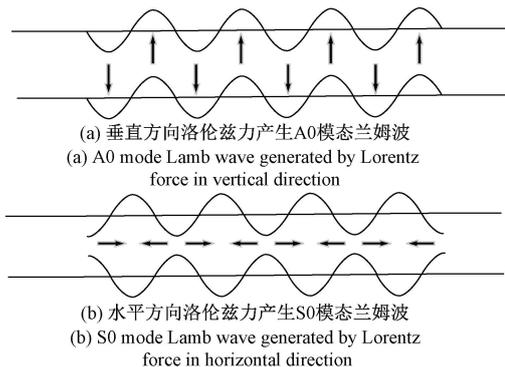


图 2 洛伦兹力方向与 Lamb 波模态的关系

Fig. 2 Relationship between Lorentz force direction and Lamb wave mode

激发电磁超声兰姆波的过程表示为:

$$f_L = f_s + f_d = J_E \times B_s + J_E \times \mu_m H_d \quad (1)$$

式中: H_d 为交变磁场的磁场强度; μ_m 为铝板的相对磁导率; f_s 为静磁场与涡流在某一点相互作用产生的洛伦兹力; f_d 为交变磁场与涡流在某一点相互作用产生的洛伦兹力; J_E 为感应涡流密度; B_s 为静态偏置磁场; f_L 为总磁场与涡流在某一点相互作用产生的洛伦兹力。

由上式可以得出,某一点洛伦兹力的方向与该点偏置静磁场方向、交变磁场方向和涡流方向有关。偏置静磁场在某一点的方向与永磁铁得几何形状、和磁场强度有关;涡流方向与曲折线圈中电流方向平行;交变磁场方向与曲折线圈中电流方向、电流交变频率、电流强度及曲折线圈的形状等有关。因此,由于交变磁场的不稳定性和不可控性,通常减弱交变磁场并强度并提高偏置磁场强度使 $f_L \approx f_s$ 。

对电磁超声换能器进行三维建模(如图 3 所示),对磁场和涡流进行分解,根据式(1)可得在某一点的洛伦兹力为:

$$f_L \approx f_s = J_E \times \mu_m H_s = \mu_m (0, 0, J_{Ez}) \times (H_{Sx}, H_{Sy}, H_{Sz}) = \mu_m J_{Ez} (-H_{Sy}, H_{Sx}, 0) \quad (2)$$

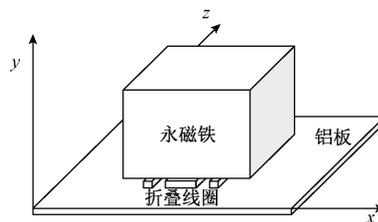


图 3 电磁超声换能器坐标系
Fig. 3 Coordinate system of electromagnetic ultrasonic transducer

从上式可以看出,某一点的洛伦兹力方向与偏置磁场在该点的磁场方向有关,即该点 y 轴方向偏置磁强度



分量 H_{sy} 产生水平方向的洛伦兹力, 有利于 Lamb 波 S0 模态的激励; 该点 x 轴方向偏置磁场强度分量 H_{sx} 产生垂直方向的洛伦兹力, 有利于 Lamb 波 A0 模态的激励。因此, 若只激励 Lamb 波的 S0 模态而抑制 A0 模态, 则只需产生水平方向的洛伦兹力而不产生垂直方向的洛伦兹力分量, 即需 $H_{sx} = 0$, 该点的磁场强度方向与 y 轴平行 ($H_s = H_{sy}$)。

2 “拱桥”结构永磁铁产生垂直均匀磁场原理

为了产生垂直方向的均匀磁场, 进而激发出单一 S0 模态, 对普通 EMAT 进行改进, 设计了由“拱桥”结构永磁铁替代传统方形磁铁的新型 EMAT, 并对该结构进行研究, 新型 EMAT 工作原理如图 4 所示。

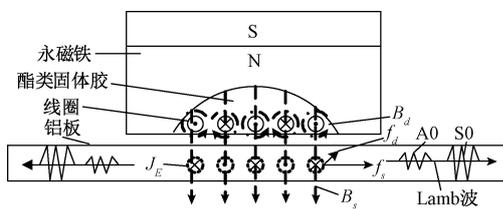


图 4 新型 EMAT 工作原理
Fig. 4 Principle of new EMAT

磁荷意义下, 距离磁荷 r 处的磁场强度定义为^[16]:

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m \vec{r}}{r^3} \quad (3)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率; q_m 为磁荷的数值; \vec{r} 为磁荷位置与距离磁荷 r 处连线的单位矢。

为了产生均匀磁场, 对“拱桥”结构永磁铁二维建模, 如图 5 所示。

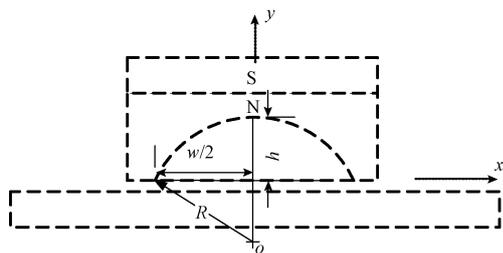


图 5 “拱桥”磁铁结构物理模型
Fig. 5 Physical model of “arch bridge” magnet structure

根据图 5, 由“拱桥”结构宽度 w 和高度 h , 知:

$$R^2 = (w/2)^2 + (R-h)^2 \quad (4)$$

即永磁铁“拱桥”部分任意 a 点的坐标为:

$$\begin{cases} y_a = \sqrt{R^2 - x_a^2} + R - h \\ -w/2 < x_a < w/2 \end{cases} \quad (5)$$

即:

$$\begin{cases} x_a = R \cos \theta \\ y_a = R \sin \theta - (R - h) \\ \arcsin \frac{R-h}{R} \leq \theta \leq \pi - \arcsin \frac{R-h}{R} \end{cases} \quad (6)$$

因此, 永磁铁“拱桥”部分下方任意 b 点到 a 点的距离为:

$$r_{ab} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (7)$$

单位矢为:

$$\vec{r}_{ab} = \frac{\vec{ab}}{|\vec{ab}|} = \frac{(x_b - x_a, y_b - y_a)}{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}} \quad (8)$$

因此, 永磁铁对 b 点的磁场强度可如图 6 所示, 其计算公式为:

$$H_b = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m \vec{r}}{r^3} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^{i=n} \frac{q_{mi} \vec{r}_{ib}}{r_{ib}^3} \quad (9)$$

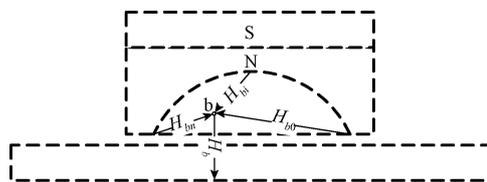


图 6 垂直方向磁场产生原理
Fig. 6 Generation principle of vertical magnetic field

对于同一个永磁铁, 其每一处的磁荷数值相同。且由式(5)~(7)可知, 永磁铁对 b 点的磁场强度为:

$$H_b = \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \int_{x_a=-w/2}^{x_a=w/2} \frac{\vec{r}_{ab}(x_a)}{r_{ab}(x_a)^3} dx \quad (10)$$

即:

$$H_b = \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \int_{\theta=\arcsin \frac{R-h}{R}}^{\theta=\pi-\arcsin \frac{R-h}{R}} \frac{\vec{r}_{ab}(\theta)}{r_{ab}(\theta)^3} R \sin(\theta) d\theta \quad (11)$$

由式(8)、(11)将磁场强度分解为水平方向分量 H_{bx} 和垂直方向分量 H_{by} , 有:

$$\begin{cases} H_b = H_{bx} + H_{by} \\ H_{bx} = \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \int_{\theta=\arcsin \frac{R-h}{R}}^{\theta=\pi-\arcsin \frac{R-h}{R}} \frac{(x_b - x_a(\theta))}{r_{ab}(\theta)^5} \cdot R \sin(\theta) d\theta \\ H_{by} = \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \int_{\theta=\arcsin \frac{R-h}{R}}^{\theta=\pi-\arcsin \frac{R-h}{R}} \frac{(y_b - y_a(\theta))}{r_{ab}(\theta)^5} \cdot R \sin(\theta) d\theta \end{cases} \quad (12)$$

因此, 若要求产生垂直方向的磁场强度, 只需

$H_{bx} = 0$ 。即:

$$\int_{\theta=\arcsin \frac{R-h}{R}}^{\theta=\pi-\arcsin \frac{R-h}{R}} \frac{(x_b - x_a(\theta)) R \sin(\theta)}{r_{ab}(\theta)^5} d\theta = 0 \quad (13)$$

对式(13)进行运算, 得:



$$\frac{(4h^2 - 10.756wh + w^2) \cdot (0.5w - x_b) \cdot f(w, h, x_b, y_b)}{g(w, h, x_b, y_b)} = 0 \tag{14}$$

其中,

$f(w, h, x_b, y_b)$ 为式(14)定积分后得分子部分

$g(w, h, x_b, y_b)$ 为式(14)定积分后得分母部分

根据式(14),可进一步计算出 h 与 w 之间的关系为:

$$h = 0.129\ 649\ 235\ w \tag{15}$$

因此,若想激励 Lamb 波的 S0 模态而抑制 A0 模态,仅需永磁铁“拱桥”结构满足式(15)即可。

3 新型 EMAT 模型

3.1 “拱桥”结构永磁铁模型

在新型 EMAT 模型中,永磁铁采用聚磁设计,在永磁铁下方与曲折线圈接触处为“拱桥”结构,使磁场在“拱桥”结构下方区域内均匀垂直于铝板试件。

根据曲折线圈大小,可计算拱桥结构宽度 w 值:

$$w = 4 \cdot \text{导线间距} + 2 \cdot \text{预留长度} = 43.5 + 23 = 20(\text{mm}) \tag{16}$$

根据式(15)、(16)可得:

$$h = 2.59(\text{mm}) \tag{17}$$

为验证“拱桥”结构永磁铁的聚磁效果,对不同弧度的“拱桥”结构进行仿真。即当 $w = 20\text{ mm}$, 拱桥高度分别为 $h = 0\text{ mm}$; $h = 2.59\text{ mm}$; $h = 5\text{ mm}$ 时,各磁场的仿真结果如图 7 所示。

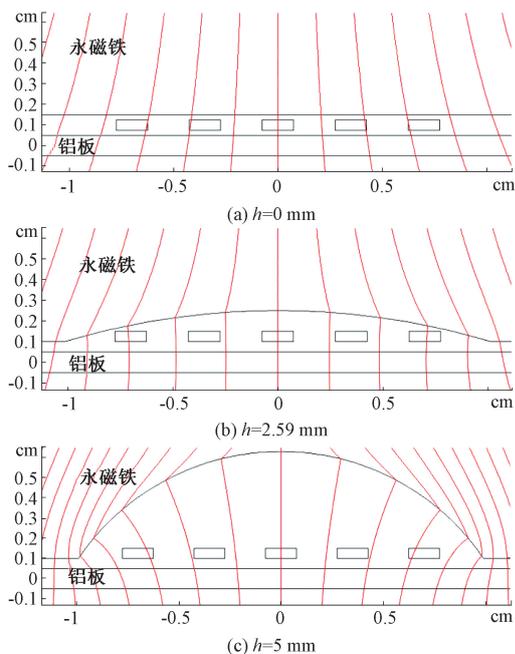


图 7 不同弧度的“拱桥”结构形成的磁场
Fig. 7 Magnetic field formed by the “arch bridge” structure of different arcs

从图 7 可以看出,相对于方形永磁铁,“拱桥”永磁铁可以使磁铁下部分区域的磁场实现了聚磁,尤其在 $h = 2.59\text{ mm}$ 时,磁力线方向垂直向下,垂直穿过线圈和铝板,聚磁效果最佳。这样就可以更好地实现 S0 模态的激励而抑制 A0 模态。

3.2 对比实验模型

接下来,为验证拱形高度为 2.29 mm 磁石结构激励单一 S0 模态的效果,建立仿真实验和实测实验对比,对比优化后的 EMAT 与普通 EMAT 激发单一 S0 模态的效果。两组 EMAT 有限元模型和结构参数如图 8 所示。

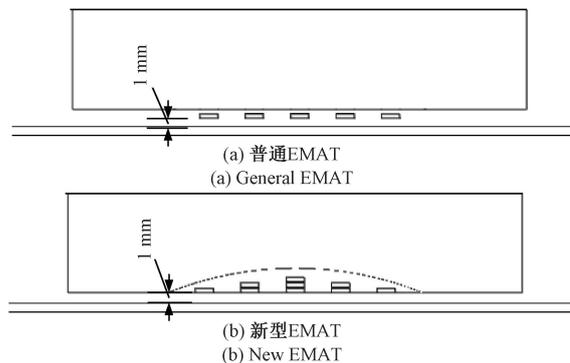


图 8 EMAT 对比实验模型
Fig. 8 EMAT comparative experimental model

4 仿真实验及结果分析

4.1 信号发射

根据 Lamb 波的频散特性^[17],可计算出 S0 模态最佳激发频率为 657 kHz ,此时 S0 模态相速度为 $4\ 651\text{ m/s}$,群速度为 $4\ 467\text{ m/s}$;A0 模态相速度为 $1\ 836\text{ m/s}$,群速度为 $2\ 648\text{ m/s}$ 。在线圈上施加频率为 657 kHz 的脉冲激励电压信号如图 9 所示,其电压信号公式为:

$$V(t) = 100e^{-\left(\frac{t_0 + t - 4}{2}\right)^2} * \sin(2\pi * f_0 * t) \tag{18}$$

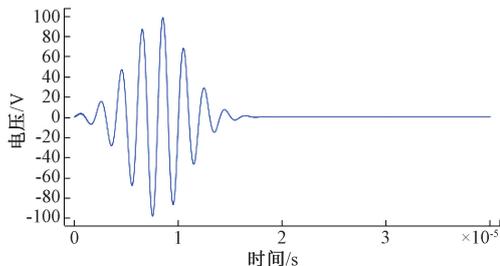


图 9 激励电压信号
Fig. 9 Excitation voltage signal



4.2 信号接收及对比

在距离电磁超声换能器 0.5 m 的位置接收基于洛伦兹力机制的兰姆波信号,为了避免端面反射对仿真结果的影响,设置端面为软声场、低反射边界。发射与接收的 EMAT 位置如图 10 所示。

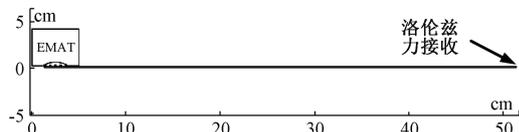
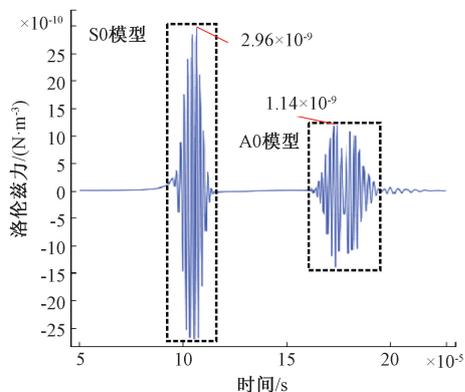


图 10 仿真实验

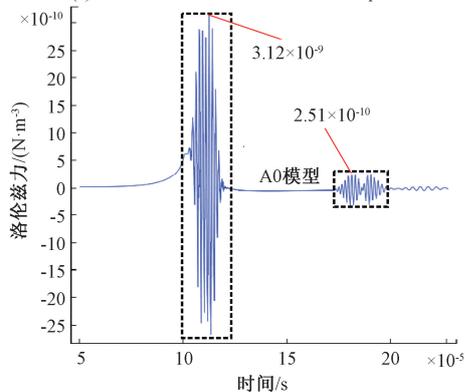
Fig. 10 Simulation experiment

优化前普通的 EMAT 与优化后的新型 EMAT 接收的信号如图 11 所示。



(a) EMAT 优化前激励的 Lamb 波

(a) Lamb wave excited before EMAT optimization



(b) EMAT 优化后激励的 Lamb 波

(b) Lamb wave excited by EMAT optimization

图 11 优化前后的 EMAT 激发的兰姆波对比

Fig. 11 Comparison of Lamb waves excited by EMAT before and after optimization

从图 11 可以看出,相比于普通方形永磁铁,“拱桥”结构永磁铁可以抑制换能器激励兰姆波的 A0 模式,而不影响换能器激励兰姆波的 S0 模式。将优化前后 EMAT 激励 lamb 波的 A0 模式和 S0 模式的幅值进行对比,如表 1 所示。

表 1 优化前后的 EMAT 接收的兰姆波信号幅值对比

Table 1 Amplitude comparison of Lamb wave signals received by EMAT before and after optimization $\times 10^{-9} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$

模式	优化前	优化后	优化后/优化前
S0	2.96	3.12	1.05
A0	1.14	0.25	0.22
S0/A0	2.60	12.48	4.80

根据表 1 可以看出,优化后的 EMAT 相比于优化前的 EMAT,激励兰姆波的 S0 模式幅值略有增加,为优化前的 1.05 倍,而 A0 模式幅值明显下降,仅为优化前的 0.22 倍;S0 模式与 A0 模式的比值,也由优化前的 2.60 倍增加到 12.48 倍。由此可见,优化后的电磁超声换能器相比于普通 EMAT,能够很好地激励 S0 模式抑制 A0 模式。

但是可以看出 A0 仍然存在,主要因为:1) 由于永磁铁形成的静磁场分布具有不均匀的特点,使得“拱桥”型永磁铁形成的磁场在“拱桥”下部分区域形成的磁场并不绝对均匀。2) 线圈形成的交变磁场与涡流相互作用会产生垂直于铝板的洛伦兹力分量,因此会产生 A0 模式兰姆波。

5 实测实验及结果分析

实验采用“一发一收”得超声检测原理,将系统分为激发部分和接收部分:激发部分主要由信号发生器产生脉冲波,经过功率放大器产生高压脉冲波,然后作用在优化后的电磁超声换能器上,电磁超声换能器将电压脉冲波转换为机械能在铝板上传播;接收部分主要由接收端电磁超声换能器将机械能转换为微弱的电能,经过前置放大器放大后由示波器显示出接收到的信号。电磁超声实验系统如图 12 所示。

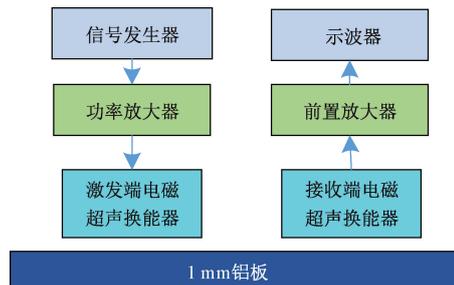


图 12 电磁超声实验系统

Fig. 12 Electromagnetic ultrasonic experimental system

优化后的永磁铁结构如图 13 所示。永磁铁采用径向充磁的磁瓦和方形永磁铁组成,其中方形永磁铁主要作增强整体永磁铁的剩磁 (Br) 和最大磁能积 (BH)。

实验平台如图 14 所示,激发部分由信号发生器、功率放大器、激发电磁超声换能器和铝板 (1 000 mm × 900 mm × 1 mm) 组成;接收部分由前置放大器、示波器组

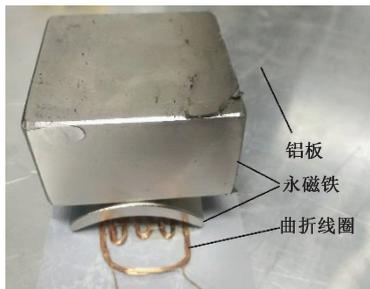


图 13 优化后的 EMAT 结构

Fig. 13 Optimized EMAT structure

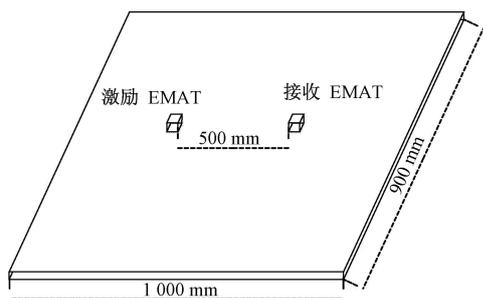


图 14 实验平台设置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of experimental platform setting

成。其中激励 EMAT 和接收 EMAT 相距 50 cm。

为研究优化后的 EMAT 相对于普通 EMAT 激发 Lamb 波的模态情况,分别使用两种 EMAT 实验平台上进行 Lamb 波的激发和接收实验,接收信号如图 15 所示。

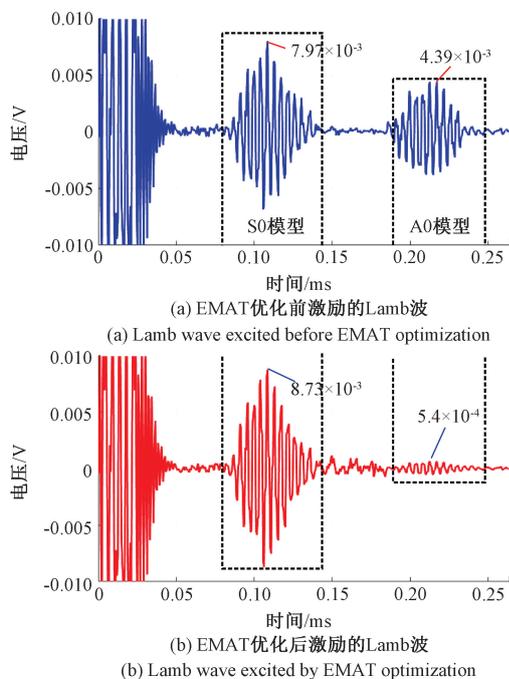


图 15 优化前后的 EMAT 接收到的 lamb 波幅值对比

Fig. 15 Comparison of Lamb amplitudes received by EMAT before and after optimization

从图 15 可以看出,优化后的电磁超声换能器相比于普通 EMAT,能够很好地激励了 S0 模态抑制 A0 模态。将优化前后 EMAT 激励 Lamb 波的 A0 模态和 S0 模态的幅值进行对比,如表 2 所示。

表 2 EMAT 优化前后接收 Lamb 波信号的幅值对比

Table 2 Amplitude comparison of received Lamb wave signal before and after EMAT optimization

模态	优化前	优化后	×10 ⁻³ (V)
			优化后/优化前
S0	7.97	8.73	1.10
A0	4.39	0.54	0.12
S0/A0	1.82	16.17	8.88

根据表 2 可以看出,优化后的 EMAT 相比于优化前的 EMAT,激励 Lamb 波的 S0 模态幅值略有增加,为优化前的 1.1 倍,而 A0 模态幅值明显下降,仅为优化前的 0.12 倍;S0 模态与 A0 模态的比值,也由优化前的 1.82 倍增加到 16.17 倍。由此可见,优化后的电磁超声换能器相比于普通 EMAT,能够很好地激励 S0 模态抑制 A0 模态。

6 结 论

针对电磁超声换能器激发 Lamb 波存在的多模态现象,本文通过 EMAT 结构进行优化实现了单一模态的激励。

首先,基于毕奥萨伐尔定律和麦克斯韦方程研究了磁场分布与激发单一模态 Lamb 波的关系,并设计出可激发单一 S0 模态 Lamb 波的聚磁“拱桥”型永磁铁模型。

其次,通过有限元仿真实验验证了优化后的电磁超声换能器激发单一 S0 模态 Lamb 波的能力,并建立了对比仿真实验,优化的 EMAT 与优化前的 EMAT 相比,激励 Lamb 波的 S0 模态幅值略有增加,为优化前的 1.05 倍,而 A0 模态幅值明显下降,仅为优化前的 0.22 倍;S0 模态与 A0 模态的比值,也由优化前的 2.60 倍增加到 12.48 倍。因此,优化后的 EMAT 相比于优化前的 EMAT,能够很好地激励 S0 模态抑制 A0 模态。EMAT 在进行优化后可以激发出单一 S0 模态 Lamb 波。

最后,通过实测实验对优化后的 EMAT 和优化前 EMAT 进行对比,优化后的 EMAT 激励 Lamb 波的 S0 模态幅值略有增加,为优化前的 1.1 倍,而 A0 模态幅值明显下降,仅为优化前的 0.12 倍;S0 模态与 A0 模态的比值,也由优化前的 1.82 倍增加到 16.17 倍。因此,优化后的 EMAT 可以很好地抑制 A0 模态,实现单一 S0 模态 Lamb 波的激励。



参考文献

- [1] 唐华溢. 涡流与电磁超声复合无损检测技术研究[D]. 浙江:浙江大学, 2014.
TANG H Y. Research on eddy current and electromagnetic ultrasonic composite nondestructive testing technology [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [2] SU ZH Q, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3): 753-780.
- [3] 刘增华, 谢穆文, 钟栩文, 等. 超声兰姆波电磁声换能器的研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(2): 192-202.
LIU Z H, XIE M W, ZHONG X W, et al. Research progress of ultrasonic guided wave electromagnetic acoustic transducer [J]. Journal of Beijing University of technology, 2017, 43 (2): 192-202.
- [4] 刘素贞, 张严伟, 霍丹, 等. 铝板材电磁超声兰姆波换能器的有限元分析及优化设计[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(6): 71-77.
LIU S ZH, ZHANG Y W, HUO D, et al. Finite element analysis and optimal design of electromagnetic ultrasonic Lamb wave transducer for aluminum plate [J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39 (6): 71-77.
- [5] 杨理践, 部金津, 邢燕好. 电磁超声兰姆波在铝板传播中的模态识别[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 909-916.
YANG L J, BU J J, XING Y H. Modal identification of electromagnetic ultrasonic Lamb wave propagation in aluminum plate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (4): 909-916.
- [6] 吴斌, 周伟, 郑阳, 等. 基于波结构的 Lamb 波单一模态激励仿真[J]. 无损检测, 2011, 33(7): 1-4+10.
WU B, ZHOU W, ZHENG Y, et al. The first mock exam of Lamb wave based on wave structure [J]. 2011, 33, (7): 1-4+10.
- [7] 鲁光涛. 基于兰姆波的薄壁结构损伤识别[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.
LU G T. Damage identification of thin-walled structures based on Lamb waves [D]. Wuhan: Wuhan University of science and technology, 2017.
- [8] 杨理践, 邢燕好, 张佳, 等. 基于电磁超声兰姆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. Detection method of aluminum plate crack defects based on electromagnetic ultrasonic guided waves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 150-160.
- [9] 王倩, 张斌, 王桔, 等. U型电磁超声换能器三维仿真研究[J]. 中国测试, 2019, 45(11): 84-89.
WANG Q, ZHANG B, WANG J, et al. Three-dimensional simulation study of U-shaped electromagnetic ultrasonic transducer [J]. China Test, 2019, 45 (11): 84-89.
- [10] 张佳. 基于电磁超声兰姆波的管道长距离检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
ZHANG J. Research on long-distance pipeline detection technology based on electromagnetic ultrasonic guided waves [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [11] 崔佳乐. 兰姆波单一模态的激励及与缺陷相互作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
CUI J L. Lamb wave single-mode excitation and interaction with defects [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [12] 刘素贞, 张严伟, 张闯, 等. 基于电磁超声双换能器的单模态 Lamb 波激励方法研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 140-147.
LIU S ZH, ZHANG Y W, ZHANG CH, et al. Research on single-mode Lamb wave excitation method based on electromagnetic ultrasonic dual transducers [J]. Journal of Electrotechnics, 2018, 33(1): 140-147.
- [13] 夏闻泽, 李松松, 张宸宸, 等. EMAT 在铝板上下表面激发 lamb 波的单一模态仿真研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(24): 17-21.
XIA W Z, LI S S, ZHANG CH CH, et al. Single-mode simulation study of lamb waves excited by EMAT on the lower surface of aluminum plate [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(24): 17-21.
- [14] CUI L, ZHAO Y, ZHAO P, et al. Review of noncontact ultrasonic non-destructive testing for the solid materials [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (528): 346-352.
- [15] HUANG S L, WEI Z, ZHAO W, et al. A new omni direction EMAT for ultrasonic lamb wave tomography imaging of metallic plate defects [J]. Sensors, 2014(14): 3458-3476.
- [16] ROSE J L. Guided wave nuances for ultrasonic nondestructive evaluation [J]. IEEE Transactions on



Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(3): 575-583.

[17] 胡友秋,程福臻,叶邦角. 电磁学与电动力学[M]. 北京:科学出版社,2008.

HU Y Q, CHENG F ZH, YE B J. Electromagnetics and Electrodynamics: Science Press [M]. Beijing: Beijing Science press, 2008.

[17] LI S S, OKADA T, CHEN X. Electromagnetic acoustic transducer for generation and detection of guided waves[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(5B):4541-4546.

作者简介



郭中会,2016年毕业于商丘师范学院获得学士学位,现为大连海洋大学在读硕士研究生,主要研究方向为超声无损检测技术和自动化装置。

E-mail:joboyle@foxmail.com

Guo Zhonghui received his B. Sc. degree in 2016 from Shangqiu Normal University, now he is master degree candidate in Dalian Ocean University. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing technology and automation device.



李松松(通信作者),2006年于日本富山县立大学获工学博士学位。现为大连海洋大学教授,硕士生导师,主要研究方向为超声无损检测技术、无损检测信号及图像处理技术。

E-mail:lisongsong@dlou.edu.cn

Li Songsong (Corresponding author) received Ph. D. from Toyama Prefectural University in 2006. Now, she is a professor and Master supervisor in Dalian Ocean University. Her main research interest is Electromagnetic acoustic testing technology and signal processing.