

基于 Halbach 阵列的电磁超声换能器的仿真设计

高明阳¹ 李松松¹ 高磊¹ 张佳琪¹ 刘璇¹

GAO Mingyang LI Songsong GAO Lei ZHANG Jiaqi LIU Xuan

摘要

针对电磁超声换能器 (EMAT) 激发的 Lamb 波存在多模态和换能效率低的问题, 提出一种基于 Halbach 阵列的电磁超声换能器设计, 其永磁体磁极方向按照 Halbach 阵列排布。与传统 EMAT 单一磁铁对比, 相同尺寸下 Halbach 阵列产生的静磁场强度有明显提高。为提高 Lamb 波单一 A0 模态的信号幅值, 对换能器曲折线圈和磁铁阵列参数进行优化。通过理论分析和二维有限元仿真, 结果表明, Halbach 阵列的换能器最大磁通密度、磁通密度 x 分量和 y 分量分别是传统型的 2 倍, Halbach 阵列换能器激发的 Lamb 波在铝板表面处位移是传统型的 8.8 倍。

关键词

电磁超声换能器; Lamb 波; Halbach 阵列; 换能效率

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.04.039

0 引言

在工业中, 磁粉检测、涡流检测和超声波检测是常用的无损检测方法。特别是超声波检测, 由于其高检测精度、广泛的应用范围和低成本等优势, 在工业领域得到了广泛应用^[1]。与压电超声换能器相比, 电磁超声换能器 (EMAT) 具有许多优点, 包括无需耦合剂、非接触操作和高度柔性。此外, 它还能够恶劣环境下 (如运动部件、高温等) 进行工作^[2]。在超声波检测中, 导波被广泛采用, 因为它具有传播距离长、衰减小的特点。Lamb 波是导波的一种形式, 主要存在于板状波导结构中, 并被广泛应用于板材的超声波探伤^[3]。

电磁超声换能器 (EMAT) 相对于压电超声换能器而言, 其换能效率较低, 这也成为其在工程应用中的一个障碍。近年来, 经过国内外许多学者的研究, EMAT 的转换效率得到了显著提升, 主要集中在调整线圈参数、磁铁设计以及激发频率等方面。Matthias 等人通过调整螺旋线圈和圆柱形磁体的相对位置, 成功抑制了 S0 模态的幅值并提高了 A0 模态的幅值^[4]。Sun 等人则利用同心反向圆柱环形磁体的组合来激发单一 A0 模态 Lamb 波^[5]。另一方面, 郭中会等人^[6]通过拱形磁铁的设计提高了 S0 模态的幅值, 并降低了 A0 模态的幅值。Zhang 等人^[7]则采用一种反转磁铁周期性排布的方法, 明显提高了 A0 模态的幅值。此外, Ren 等人^[8]通过使用硅

钢背板成功提高了 EMAT 体波的转换效率。张迈一等人^[9]通过优化周向环形 Halbach 磁体结构, 显著增强了回波信号。此外, 杨理践等人^[10]研究了频厚积与激发 Lamb 波单一模态的关系。Lamb 波模式通常分为两类, 即对称模式和反对称模式, 而与纵波和横波相比, 兰姆波具有更远的传播距离和更小的衰减, 因此主要用于板材的无损检测。尽管有许多关于提高体波和表面波转换效率的研究, 但关于提高单一模态 Lamb 波换能器的转换效率和结构改进的研究相对较少见。本文使用曲折形线圈和 Halbach 阵列永磁体组合在铝板中激发 Lamb 波, 通过有限元仿真得到 Halbach 阵列磁场分布特征, 并按照水平磁场分布特征部署曲折线圈。新型 Halbach 阵列 EMAT 激发出 Lamb 波的 A0 模态幅值明显大于传统 EMAT 激发出 Lamb 波的 A0 模态幅值, 换能器的换能效率得到了提高, 提高了电磁超声导波检测在板材检测中的应用价值。

1 Lamb 波激发机理

电磁超声换能器激发 Lamb 波有三种机理, 分别是洛伦兹力机理、磁致伸缩力机理和磁化力机理。在铝板中激发 Lamb 波只存在洛伦兹力机理。电磁超声换能器的核心部分是线圈和永磁铁, 线圈的形状影响了超声震源的分布形式, 永磁铁产生的静磁场影响了声波的强度。当线圈中通入高频交变电流时, 在铝板的趋肤深度会产生同频的涡流, 永磁铁产生的静磁场与铝板内的涡流在洛伦兹力作用下引起质点的周期性振动, 这种振动在板材内以波的形式传播形成超声波。由电磁理论可知, EMAT 在铝板内激发洛伦兹力的过程可以用麦克斯韦方程组和洛伦兹力公尺进行描述。

麦克斯韦方程组微分形式如下:

1. 大连海洋大学 辽宁大连 116000

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (51778104); 辽宁省教育厅科学研究项目 (DL202005); 辽宁省渔业厅资助项目 (201723)

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = J_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： ∇ 为Nabla算子； $\vec{H}$ 为磁场强度； J_c 为电流密度； $\vec{D}$ 为电位移矢量； t 为时间变量； $\vec{E}$ 为电场强度； $\vec{B}$ 为磁感应强度； ρ 为磁荷密度。

根据麦克斯韦方程数学模型将 EMAT 在铝板中激发电磁超声 Lamb 波的过程表示为：

$$f_l = f_s + f_d = J_E \times B_s + J_E \times \mu_m H_d \quad (2)$$

式中： H_d 为交变磁场的磁场强度； μ_m 为铝板相对磁导率； f_s 为静态磁场与感应涡流在一点的洛伦兹力； f_d 为交变磁场与感应涡流在一点的洛伦兹力； J_E 为感应涡流密度； B_s 为静态偏置磁场的磁感应强度； f_l 为总磁场与感应涡流在一点的洛伦兹力。

由于交变磁场的不确定性和不可控性，交变磁场的磁场强度相对于静磁场的磁场强度非常小，可忽略不计，使得 $f_l \approx f_s$ 。电磁超声换能器三维建模如图 1 所示，对磁场和涡流进行分解，根据式 (1) 可得在一点的洛伦兹力为：

$$\begin{aligned} f_l &\approx f_s = J_E \times \mu_m H_s \\ &= \mu_m (0, 0, J_{EZ}) \times (H_{sx}, H_{sy}, H_{sz}) \\ &= \mu_m J_{EZ} (-H_{sy}, H_{sx}, 0) \end{aligned} \quad (3)$$

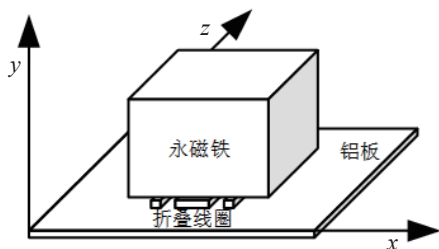


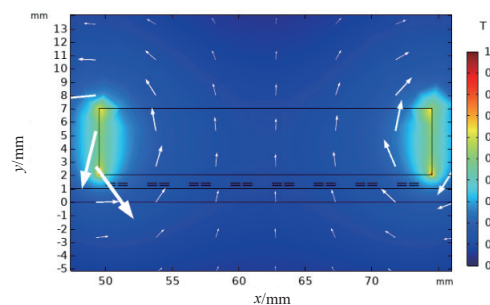
图 1 电磁超声换能器三维建模

从以上公式可以得出，铝板上某个点的洛伦兹力与铝板的相对磁导率、感应涡流密度和磁场强度有关，而任意点处的洛伦兹力方向与此处磁场方向相关，即该点 x 轴方向静态偏置磁场分量 H_{sx} 影响垂直方向的洛伦兹力，该点 y 轴方向静态偏置磁场分量 H_{sy} 影响水平方向的洛伦兹力。因此，增强 H_{sx} 有利于 Lamb 波 A0 模态的激发，增强 H_{sy} 有利于 Lamb 波 S0 模态的激发。

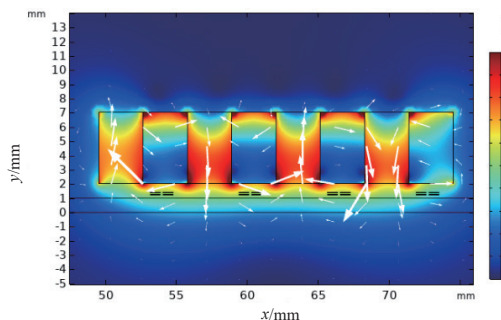
2 Halbach 阵列 EAMT 仿真分析

传统永磁铁磁通密度云图和 Halbach 阵列永磁铁磁通密度云图如图 2 所示。从图 2 中可以看出 Halbach 阵列永磁铁比传统永磁铁产生的磁通密度更大，且磁通密度 x 分量更明

显。在永磁铁下方 2 mm 处（铝板上表面处），磁通密度沿永磁铁宽度分布情况如图 3 所示，从图 3 (a) 中可以看出传统永磁铁存在端部效应，磁铁两端磁通密度最大，最小值在磁铁中心处，从两端逐渐向中间降低。Halbach 阵列永磁铁的磁通密度显著大于传统永磁铁的磁通密度。传统永磁铁磁通密度 x 分量在两端出现两个峰值，且从两端向磁铁中心逐渐减小。Halbach 阵列永磁铁磁通密度 x 分量出现多个峰值，并且峰值大于传统永磁铁中出现的峰值。

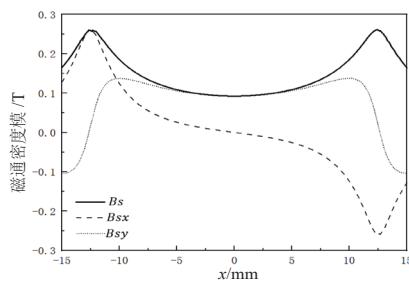


(a) 传统永磁铁

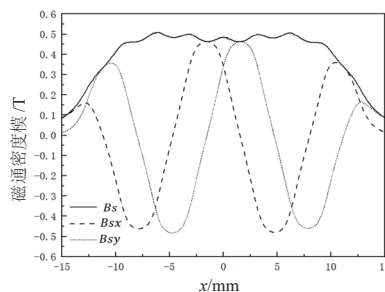


(b) Halbach 阵列永磁铁

图 2 传统永磁铁和 Halbach 阵列永磁铁磁通密度图



(a) 传统永磁铁



(b) Halbach 阵列永磁铁

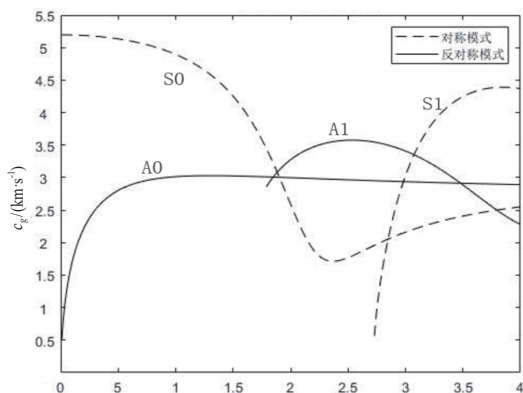
图 3 传统永磁铁和 Halbach 阵列永磁铁磁通密度曲线

传统永磁体磁通密度 y 分量在两端出现两个峰值，与 x 分量变化趋势相同，Halbach 阵列永磁体磁通密度 y 分量有多个峰值出现，且峰值大于传统永磁体中出现的峰值，此外 x 分量峰值和 y 分量峰值交替出现。

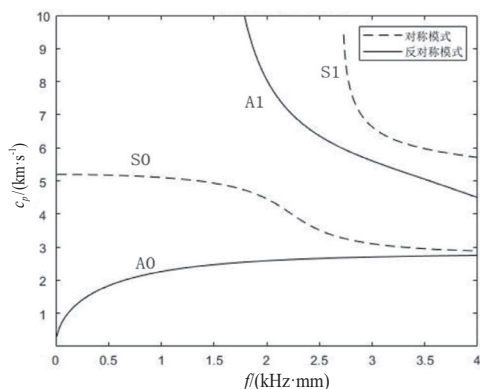
A0 模式主要基于平面外位移，而 S0 模式主要基于面内位移。结合左手定律可知，水平方向的静磁场有利于 A0 模式的激发，而垂直方向的静电场有利于 S0 模式的激发。由此，增加磁通密度的水平分量与垂直分量的比率有利于抑制 S0 模式并产生纯 A0 模式。图 3 (b) 显示，Halbach 阵列永磁体的水平充磁下方的水平方向磁场 B_{sx} 达到峰值，而垂直方向的磁场 B_{sy} 为 0，在此处部署线圈更有利于 A0 模式的激发。

3 Halbach 阵列 EMAT 与传统 EMAT 效果对比

Lamb 波在铝板中的频散特性曲线如图 4 所示。当频率厚度乘积较大时，兰姆波具有多种模式。因此，应选择具有较小频率厚度乘积的工作点，以减少 Lamb 波的模式。本工作中选择的工作点的频率厚度乘积为 $180 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$ ，在此工作点时 A0 模式的波长 $\lambda=6.35 \text{ mm}$ 。



(a) 群速度



(b) 相速度

图 4 铝板频散曲线

Halbach 阵列 EMAT 和传统 EMAT 的工作原理相同，但 Halbach 阵列 EMAT 的永磁体是由周期性排列的小磁铁组成的。根据静态磁场分析和 Lamb 波模式分析，为了更好地激

发 A0 模式，抑制 S0 模式，曲折线圈的导线应直接放置在 Halbach 阵列水平充磁磁铁下方。Halbach 阵列水平磁场和垂直磁场峰值交替出现，为保证线圈总是位于水平磁场处，单个小磁铁的宽度 w 和曲折线圈的间距 d 应满足 $w=d/2$ 。

在曲折线圈设计过程中，间距 d 与波长 λ 一般需满足 $d=n\lambda/2$ ， $n=1,2,3,\dots$ 。当曲折线圈的间距为 $\lambda/2$ 时，单个小磁铁的宽度 $w=d/2=\lambda/4=1.56 \text{ mm}$ 。考虑到试验条件， 1.56 mm 宽的永磁体不容易在市场买到，因此曲折线圈间距选择 $d=\lambda=6.35 \text{ mm}$ ，此时单个小磁铁宽度为 3.13 mm 。传统的方形磁铁与 Halbach 阵列永磁体的总体宽度保持一致。Halbach 阵列永磁体和传统的方形磁铁高度均为 5 mm 。

为了更好地进行比较研究，除了结构上的差异外，传统 EMAT 和新型 EMAT 的部件中使用的材料在以下所有方面都完全相同，磁体材料均为 N50，N50 的剩余磁通密度为 1 T 。Halbach 阵列 EMAT 和传统 EMAT 有限元模型分别如图 5、图 6 所示。

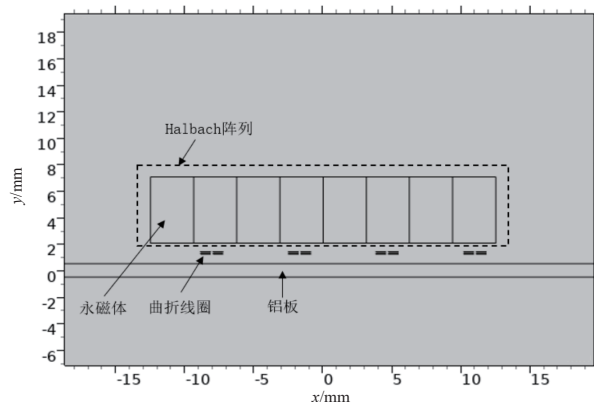


图 5 Halbach 阵列 EMAT 有限元模型

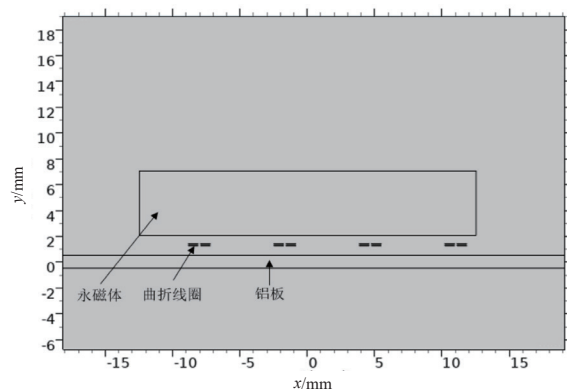


图 6 传统 EMAT 有限元模型

电磁超声换能器在铝板内产生的洛伦兹力作用在质点上，质点的运动在铝板内产生超声波，因此通过分析质点的位移情况可以得出电磁超声换能器的换能效果。在铝板上表面距离 EMAT 发射端 250 mm 处设置一个接收点，在该点处两个 EMAT 模型位移结果分别如图 7、图 8 所示。从图 7 和图 8 可以看出，铝板表面质点面外位移都只有两个波包。当传

播距离相同时,波包的到达时间也相同。图7显示了 Halbach 阵列 EMAT 该质点面外位移最大值为 3.08×10^{-7} mm, 图8显示了传统 EMAT 在该质点面外位移最大值为 0.35×10^{-7} mm。Halbach 阵列 EMAT 激发的 Lamb 波幅值明显大于传统 EMAT 产生的 Lamb 波幅值。

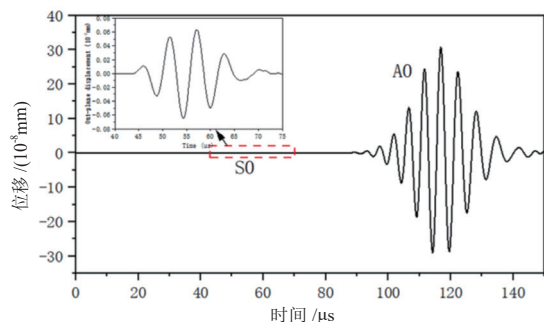


图7 Halbach 阵列 EMAT 铝板表面质点位移图

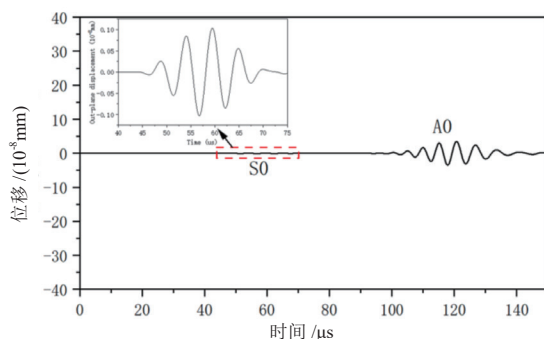


图8 传统 EMAT 铝板表面质点位移图

传统 EMAT 与 Halbach 阵列产生 A0 模态信号幅值比为:

$$\frac{A_{\text{新型}}}{A_{\text{传统}}} = \frac{3.08}{0.35} = 8.8 \quad (4)$$

由此可见, Halbach 阵列电磁超声换能器相比于传统电磁超声换能器,能够很好地激励 Lamb 波的 A0 模态。

4 结论

本文使用一种 Halbach 阵列电磁超声 Lamb 波换能器来增强 Lamb 波 A0 模态,并进行理论分析和有限元仿真分析。首先,分析了电磁超声换能器激发 Lamb 波的原理,通过麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式得出磁场方向对 Lamb 波模式选择的影响,水平磁场有利于 Lamb 波 A0 模态的激发,垂直磁场有利于 Lamb 波 S0 模态的激发。然后,提出了 Halbach 阵列和曲折线圈组合的新型电磁超声换能器, Halbach 阵列永磁体由多个尺寸相同的小永磁体按照规定充磁方向排列组成,对比传统电磁超声换能器,该阵列构成的新型换能器局部磁通密度和水平分量有明显增加。最后,建立二维有限元仿真模型,按照水平磁场峰值规律部署线圈,可以发现 Halbach 阵列电磁超声换能器激发出 Lamb 波的 A0 模态幅值明显大于传统电磁超声换能器的幅值,进一步提高了电磁超

声导波检测在板材检测中的应用价值,为电磁超声换能器的设计提供了一种新的选择。

参考文献:

- [1] 彭文涛,杨晓庆.可调节跑道型线圈电磁超声换能器设计[J].信息技术与信息化,2023(11): 28-31.
- [2] 刘素贞,王淑娟,张闯,等.钢板电磁超声表面波的仿真分析及缺陷定量检测[J].电工技术学报,2020,35(1): 97-105.
- [3] PEI C X, LIU T H, CHEN H, et al. Inspection of delamination defect in first wall with a flexible EMAT-scanning system[J]. Fusion engineering and design, 2018, 136: 549-553.
- [4] SEHER M, HUTHWAITEET P, LOWE M, et al. Numerical design optimization of an EMAT for A0 lamb wave generation in steel plates[M]//40th annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation: incorporating the 10th international conference on barkhausen noise and micromagnetic testing. New York: AIP Publishing, 2014:340-347.
- [5] SUN W X, LIU G Q, XIA H, et al. A modified design of the omnidirectional EMAT for antisymmetric Lamb wave generation[J]. Sens actuators, 2018, 282: 251-258.
- [6] 郭中会,李松松,何慧敏,等.基于电磁超声换能器的兰姆波单一模态激励方法研究[J].仪器仪表学报,2021,42(5): 253-260.
- [7] ZHANG W L, WU Y X, WU Y T, et al. An improved design of lamb wave EMAT for A0 wave generation and enhancement[J]. Japanese journal of applied physics, 2021, 60(3): 036501.
- [8] REN W, HE J, 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.
- [9] ZHANG M Y, CHEN R W, ZHANG Y F. Design and optimization of electromagnetic ultrasonic body wave probe based on halbach structure[J]. Transactions of nanjing university of aeronautics and astronautics, 2022, 39(S1): 127-134.
- [10] 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.

【作者简介】

高明阳(1997—),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向:电磁超声无损检测。

李松松(1973—),女,辽宁丹东人,博士,教授,研究方向:超声无损检测技术及信号处理技术。

(收稿日期:2024-02-23)