

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412558

基于海尔贝克式排布的电磁铁 EMAT 研制*

刘增华¹, 郑坤松², 朱艳萍¹, 郭彦弘², 何存富¹

(1. 北京工业大学信息科学技术学院 北京 100124; 2. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124)

摘要:电磁声传感器由于其结构简单且无需耦合等特点,在超声无损检测领域具备显著的应用潜力。传统的永磁铁式横波电磁声传感器存在诸多缺陷,包括换能效率低、激发超声模式不具一致性,以及在铁磁性试件上检测时吸附力强、难以移动等,这些问题不仅影响了检测结果的准确性,也限制了其应用范围。本研究基于永磁铁海尔贝克式电磁声传感器以及空芯电磁铁电磁声传感器的特点,研制了一种新型的电磁铁横波传感器,实现单侧磁场增强的同时,可实现偏置磁场强度可调。本文采用正交试验的方法对传感器励磁磁铁以及涡流线圈结构参数进行优化,提高了回波信号的幅值。研究表明,经过优化后的电磁声传感器对于铝板的检测,可显著增加试件表面产生的垂直磁场强度及分布范围,并大幅降低水平磁场,能够更有效地激发较为纯净的横波。

关键词:电磁铁;海尔贝克式电磁声传感器;横波;正交试验

中图分类号: TH17 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

Development of electromagnet EMAT based on Halbach arrangement

Liu Zenghua¹, Zheng Kunsong², Zhu Yanping¹, Guo Yanhong², He Cunfu¹

(1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Due to its simple structure and no need of coupling, the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) holds significant potential in the field of ultrasonic nondestructive testing. However, traditional permanent magnet iron shear wave EMATs have several drawbacks, including low energy conversion efficiency, inconsistency in the generated ultrasonic modes, strong magnetic attraction, and difficulty in movement. These issues not only impact the accuracy of test results but also limit the range of applications. This study introduces a new type of electromagnet shear wave transducer, combining the features of permanent magnet Halbach EMATs and hollow electromagnet EMATs. This novel design enhances the magnetic field on one side and allows for adjustable bias magnetic field intensity. The study employs an orthogonal experimental method to optimize the structural parameters of the transducer's excitation magnet and eddy current coil, resulting in improved echo signal amplitude. The findings indicate that the optimized EMAT significantly enhances the intensity and distribution range of the vertical magnetic field on the specimen surface while greatly reducing the horizontal magnetic field, thereby more effectively generating pure shear waves.

Keywords: electromagnet; halbach electromagnetic acoustic transducer; shear wave; orthogonal test

0 引言

铝板由于强度高、可塑性强并具有较好的耐腐蚀性等优点,被广泛应用于航空航天、化工、机械等领域。然而,在实际使用过程中,铝板容易出现裂纹、腐蚀、分层等缺陷,这些缺陷严重影响工件的服役可靠性和安全性^[1]。

裂纹的产生可能导致材料局部应力集中,进而引发断裂。在航空航天领域,这种裂纹可能导致飞机机身、机翼等关键部位的突然失效,造成严重的飞行安全事故^[2]。腐蚀是另一个常见的问题,特别是在化工环境中。在化工领域,腐蚀不仅会影响设备的正常运行,还可能导致有害化学物质的泄漏,对环境 and 人类健康造成威胁^[3]。分层缺陷则通常发生在制造过程中,尤其是多层复合材料的制

收稿日期:2024-02-29 Received Date: 2024-02-29

* 基金项目:国家自然科学基金(12172015)项目资助

造中。分层会削弱材料的整体强度,导致局部脱层,影响其承载能力^[4-5]。

为了提高铝制零部件在各种领域的服役可靠性和安全性,检测技术显得尤为重要。电磁声检测技术结合了静磁学、电磁学和超声学的特点,具有精度高、无需耦合剂、易于激发各种超声波模态等特点,近些年得到了迅速的发展。洛伦兹力电磁声传感器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)具有非接触性,无需预处理和涂抹声耦合剂,灵活激发多种类型的超声导波,适用于导电和铁磁性材料的检测。磁致伸缩 EMAT 对高铁磁性材料的检测效率更高,采用贴片式设计,扩展了对非金属材料的应用范围,并适用于长期远程结构健康监测。阵列式 EMAT 通过优化线圈和磁体结构,提高了激励导波的能量和模式单一性,结合成像算法,实现对缺陷的精准定位与成像^[6]。然而,传统的永磁铁 EMAT 换能效率较低,且受制于仅能在固定的方向产生恒定的磁场,限制了其应用范围^[7]。

因此,开展新型 EMAT 的研究显得尤为必要。新型传感器应具备更高的换能效率,能够在多个方向产生可调节的磁场,以适应不同检测需求。此外,新型传感器还应具备更高的灵敏度和稳定性,以便更准确地检测铝板中的细微缺陷,确保各行业中的铝板应用更加安全可靠。通过不断创新和改进电磁声传感器技术,能够更好地保障各领域中心铝板材料的使用安全,提高工业生产的整体水平^[8]。

基于永磁铁 EMAT 存在的应用局限性,许多学者对此提出了改进措施。利用电磁铁替换永磁铁,为 EMAT 提供静磁场,并开展了相关研究,电磁铁按照通入电流的类型主要有直流电磁铁,交流电磁铁和脉冲电磁铁。Murayama 等^[9]设计了用于兰姆波研究的直流电磁式电磁超声体波传感器,其激发磁场稳定、强弱可调,但直流电磁式电磁超声体波传感器能耗巨大、励磁线圈发热严重,需要额外配置冷却系统保证传感器的性能,致使传感器结构复杂。Xie 等^[10]设计了一种用于非铁磁性管道的新型纵模导波 EMAT 周期性脉冲电磁铁,使用大型脉冲电流发生器产生强脉冲偏置磁场,用于产生检测导波,通过对洛伦兹力机制中产生的超声场和在不锈钢管道中测量到的信号进行模拟,研究了其可行性,仿真结果表明,新型 EMAT 适合在非铁磁性管道中产生 $L(0,2)$ 模态,并通过相应的实验进行了验证,证明了该方法可用于不锈钢管道缺陷的测量,文中还对新型周期性脉冲电磁铁电磁声传感器(periodic pulsed electromagnets electromagnetic acoustic transducer, PPEM EMAT)的频率响应进行了分析,为传感器的设计优化提供了有益的见解。同时,验证了偏置磁场对导波信号的幅度有非常重要的影响。随着 PPEM 的电压增加,导波振幅的增加速率提升,这与基于洛伦兹力的 EMAT 理论中转换效率与磁场强度的平方成正比的关系是一致的。

因此由于脉冲电磁铁可以产生比传统永磁铁和直流电流电磁体更强的磁场,使用 PPEM 来提高 EMAT 的转换效率是一种有前景的方法。Liu 等^[11]设计了一种主要激励模态为 A_0 的兰姆波高能脉冲 EMAT,研究了线圈产生动态强磁场和涡流在钢板中相互作用时激发声波的传导机制。通过超声传播特性和缺陷检测实验对钢板进行了测试,仿真和实验结果显示,曲折线圈高能脉冲 EMAT 的感应磁致伸缩力和洛伦兹力并不完全叠加。当提离距离接近 2 mm 时,位移幅值衰减规律也不同于传统 EMAT。与传统的 EMAT 相比,高能脉冲 EMAT 在钢板上避免了磁铁对其施加的磁力吸引效应,并且减少了声信号对提离距离的衰减影响,这意味着高能脉冲 EMAT 具有新的应用潜力。翟国富等^[12-13]采用双线圈配置的高温 EMAT 来产生横波和纵波模式,并研究了顺磁性钢中的纵波模式,克服了现有的高温 EMAT 主要是横波 EMAT 这一缺陷。开发了双线圈 EMAT 实验平台,所提出的 EMAT 可以提供横向和纵向具有相似强度的磁场,通过调整电磁线圈与激励线圈的配置关系,实现了横波、纵波和横纵波模式的选择性产生,依照提出的耐高温双线圈结构 EMAT,对从室温到 450℃ 的不锈钢试件实现了多次回波信号采集,具备对高温金属进行在线监测能力。

针对永磁铁 EMAT 磁场强度及方向固定且激发超声波体模态复杂的问题,本研究介绍了海尔贝克电磁铁 EMAT 模型,分析海尔贝克式电磁铁 EMAT 激励磁场以及试件内部位移场分布,应用正交试验的方法对 EMAT 设计参数进行优化。并通过实验,分析优化后 EMAT 的单方向聚磁和激励较为纯净横波的能力。

1 基本原理

传统的 EMAT 通常将激励线圈布置在单个永磁铁或电磁铁下方,用于激励横波。这种配置方式难以在试件表面产生均匀且方向性单一的垂直磁场,限制了检测灵敏度和准确性。海尔贝克阵列通过特定的磁铁排列方式,可以有效地解决这一问题。这种新型排布方式将不同磁化方向的永磁铁按照空间旋转方式排列,使得阵列在单侧的磁场显著增强,同时在另一侧减弱磁场强度。平面海尔贝克阵列通过将每个磁铁的磁化方向与相邻磁铁的磁化方向成 90° 排列,形成单侧增强的磁场结构。具体排布方式如图 1 所示。

在一维磁化模式中,沿 x 方向的磁化强度矢量 $\mathbf{M}_{(x)}$ 的数学表达式为:

$$\mathbf{M}_{(x)} = M_0 \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

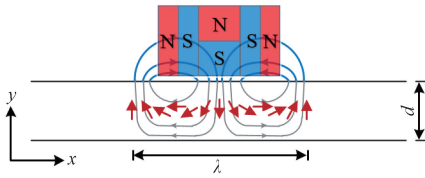


图1 平面海尔贝克 EMAT 示意图

Fig.1 Schematic diagram of planar Halbach EMAT

式中： M_x 表示的是磁化强度矢量，它描述了材料在空间位置 x 处的磁化方向和强度。在海尔贝克阵列的描述中，磁化强度矢量用来表示每个永磁体在不同位置的磁化方向，其中， M_0 是磁化强度的幅值， λ 是指磁化方向周期性变化的长度。具体来说，一个波长是指磁化方向从初始状态经过完整的 360° 变化后再次回到初始状态所需要的距离。这个表达式表示磁化方向随着位置 x 的变化而旋转，形成海尔贝克阵列中不同磁铁的磁化方向排列。

对于平面排布的海尔贝克结构，在试件厚度为 d 且在 $y>0$ 的表面上方的磁场分量为：

$$B(x, y) = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = B_r(1 - e^{-\frac{2\pi}{\lambda}d})e^{-\frac{2\pi}{\lambda}y} \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中： B_r 是磁材料的剩磁； B_x 和 B_y 分别表示磁场在 x 方向和 y 方向的分量。这些分量在磁铁材料外部呈现出谐波性质，即它们是空间周期性变化的，这种谐波性质使得海尔贝克阵列在一侧产生较强的磁场，而在另一侧的磁场强度则较弱，从而实现单侧增强的效果。这种增强效果是通过空间上正弦和余弦函数的周期性变化以及垂直方向的指数衰减共同作用的结果。

由周期性永磁体(periodic permanent magnets, PPM)阵列和海尔贝克阵列的磁场分布可知，PPM 阵列中的磁铁磁化方向是交替变化的，形成一个周期性排列。在这种排列中，每个磁铁的磁化方向相反，图2 中的磁场分布显示，PPM 阵列的磁场在上下两侧均等分布，没有显著的单侧增强效果。磁场强度在磁铁之间的间隙区域明显减弱，表现出较大的非均匀性，而海尔贝克阵列通过特定的磁铁排列方式使得磁场在阵列的下侧显著增强，而在上侧被大幅减弱。通过有限元仿真，验证了海尔贝克阵列可实现单侧增强的效果。

相对于永磁体构成的海尔贝克阵列 EMAT，采用如图3 所示的无铁芯结构励磁线圈代替单个永磁体，并实现海尔贝克排布，这种方法不仅可以实现单侧磁场增强，还可以通过调节励磁信号的相位和幅值，以及励磁线圈的几何结构，灵活改变磁场的强度、方向和大小，从而激

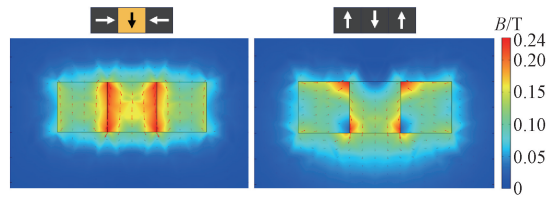


图2 周期性永磁体与海尔贝克电磁铁 EMAT 磁场强度分布
Fig.2 Magnetic field distribution of PPM and Halbach EMAT

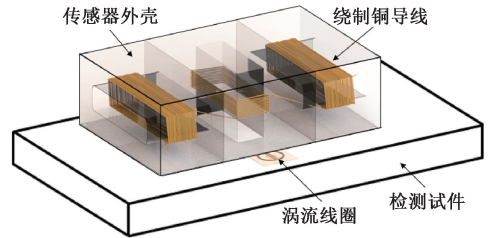
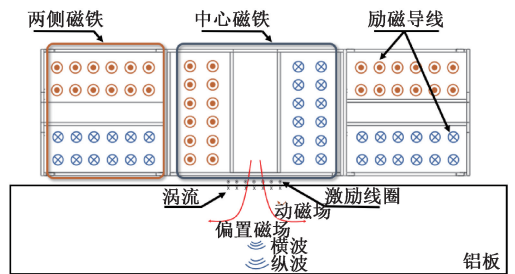


图3 海尔贝克式电磁铁 EMAT 示意图

Fig.3 Schematic diagram of Halbach electromagnet EMAT

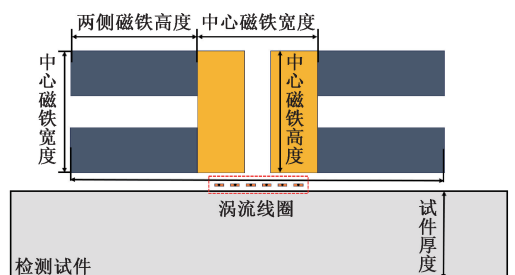
励出较为纯净的横波。

对于非铁磁性材料的铝板，利用 EMAT 产生横波的过程主要基于洛伦兹力，如图4(a)所示。基于洛伦兹力的横波激发过程主要基于电磁耦合作用，当激励线圈通入脉冲电流时，在试件的集肤深度附近感应出交变涡流，与垂直磁场相互作用，形成平行于试件表面且方向相同的洛伦兹力，从而实现横波的高效激发。



(a) EMAT激励超声波原理图

(a) Principle diagram of ultrasonic wave excitation by using EMAT



(b) 仿真几何模型

(b) Simulation geometry model

图4 超声激励原理及仿真模型

Fig.4 Ultrasonic excitation principle and simulation model

应用于铝板中的 EMAT,其电场及磁场之间的换能式为:

$$B_d = \mu_r H_d \quad (3)$$

$$\nabla \times E_e = -\frac{\partial B_d}{\partial t} \quad (4)$$

$$J_e = \gamma E_e \quad (5)$$

式中: B_d 为交变动磁场磁通量密度; μ_r 为铝板相对磁导率; H_d 为铝板中感应动磁场强度; E_e 为感应电场强度; γ 为铝板电导率。

铝板中感应涡流 J_e 与电磁铁提供的偏置磁场 B_s 以及激励电流产生的动磁场 B_d 相互作用产生洛伦兹力 F_L 计算公式为:

$$F_L = J_e \times B_s + J_e \times B_d \quad (6)$$

2 有限元仿真分析

利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 建模并仿真海尔贝克式电磁铁 EMAT 激励超声波过程。建立二维有限元仿真模型示意图如图 4(b) 所示。其中励磁线圈采用无铁芯励磁线圈单元组成,并呈海尔贝克式排布,通入励磁电流大小为 5 A。

励磁线圈实现传感器下表面聚磁,提供的偏置磁场分布特征如图 5 所示,由图可知,海尔贝克式排布的电磁铁可在试件表面产生磁场较为集中的偏置磁场。

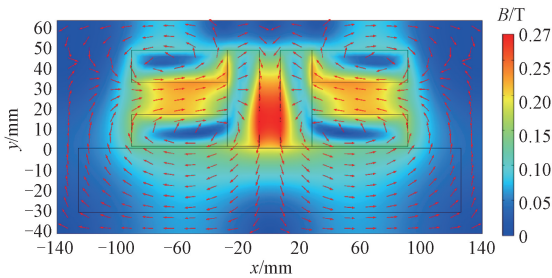


图 5 磁场分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of magnetic field

试件表面不同位置的磁通密度分布曲线如图 6 所示,由图可知在励磁线圈中心位置下方形成了较为均匀的垂直磁场,且在水平励磁单元下方形成了较为均匀的水平磁场。传感器上表面的垂直磁场强度和水平磁场强度如图 7 所示,相较于于试件表面的磁场强度及磁场均匀度大幅下降,表明传感器励磁部分可实现单侧聚磁。同时,绘制的磁通密度曲线也进一步验证了式(2)中海尔贝克式磁铁排在在磁场周围形成谐波性质分布的特点。

通入蝶形激励线圈的激励信号如图 8 所示,为经过汉宁窗调制的五周期正弦波。图 9(a) 为激励横波常用的螺旋线圈在试件表面,经多物理场耦合后得到的超声

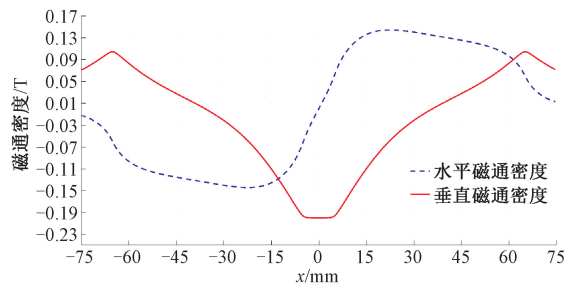


图 6 试件表面磁通密度

Fig. 6 Surface magnetic flux density of specimen

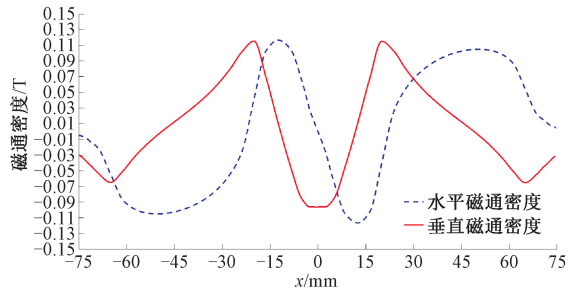


图 7 传感器上表面磁通密度

Fig. 7 Flux density on the upper surface of the transducer

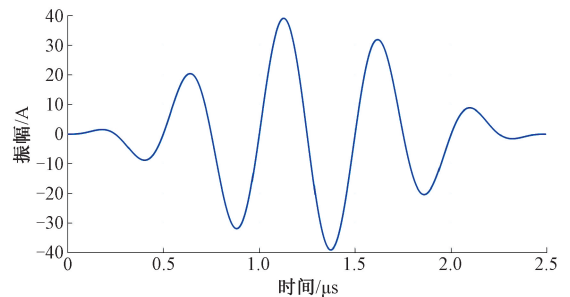


图 8 激励线圈激励波形

Fig. 8 Excitation waveform of excitation coil

波声场分布仿真结果。其中,图 9(b) 为试件内部位移时域响应图。

由于体波在传播过程中无频散现象,所以在材料中的传播速度不随激励频率变化,波速仅与材料的杨氏模量 E ,密度 ρ ,以及泊松比 ν 有关。其中横波与纵波的计算公式为:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (7)$$

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (8)$$

通过式(7)和(8),可计算出铝板中的横波理论波速为 3 120 m/s,纵波理论波速为 6 186 m/s。利用渡越时间法,计算图 9(b) 中两个波形连续波包的波速分别为

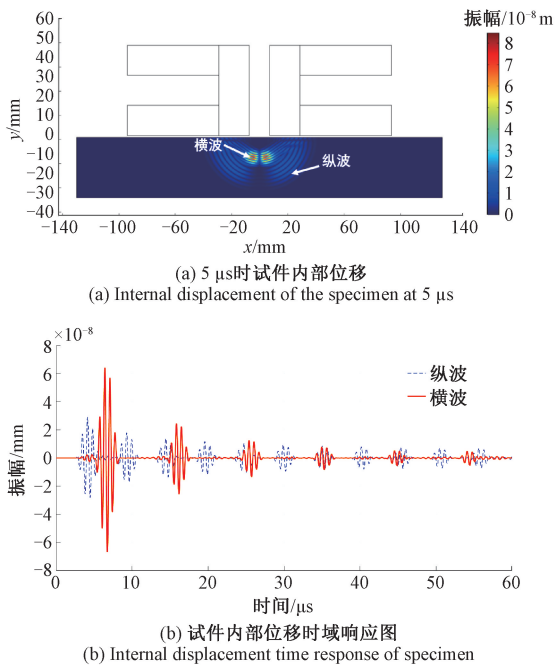


图9 试件内部位移场分布情况

Fig. 9 Distribution of displacement field in the specimen

3 125 m/s 和 6 175 m/s。仿真结果与理论波速之间的相对误差分别为 0.160%、0.177%，仿真结果证明该结构参数下传感器可成功激励出横波及纵波。由两个波形图中一次回波的幅值可得，激励横波与纵波幅值比为 1.55，为使传感器激励更为纯净的超声横波，需对励磁线圈结构及激励线圈参数做进一步优化。

为激励更为纯净的超声横波，提高激励横纵波比值，将在 COMSOL 中采用正交优化方法，模拟不同参数设置下的磁场分布和超声体波模态，通过对励磁线圈和激励线圈的结构参数进行调整，以找到最优的参数设置。并通过实验验证，分析实验中激励的超声波模态，并将其与仿真结果进行对比，以验证优化设计的有效性和可靠性。

3 励磁线圈与激励线圈参数优化

3.1 中心磁铁结构参数优化

为探究传感器设计参数对励磁结果的影响，需对各种影响因素的精确数值进行测试，然而完整的测试方法检查量大且时间成本高^[14-15]。正交试验的方法因分散均匀、客观概括以及整齐可比的特点，被广泛应用于解决多因素多层次的问题^[16-17]。

正交试验优化的方法由因素以及水平数建立正交表，其中因素为影响指标的参数，水平是每个因素的取值，指标则为优化的目标。建立的正交表由 $L_n(q^m)$ 表示。 L 为正交表， n 为试验次数， q 为水平数， m 为因素个

数。对于正交试验结果的分析，包含方差分析法和极差分析法。其中方差分析法能够确定各个因素对于指标的影响大小，极差分析法则可确定在各个因素中对于指标影响较大的具体因素^[18]。

在建立海尔贝克排布电磁铁 EMAT 有限元仿真模型的基础上，对励磁线圈进行参数优化。由式(2)可知，海尔贝克排布的 EMAT，其励磁强度受到试件厚度、单个磁铁的磁化强度、磁铁的尺寸以及阵列排布的磁铁磁化方向周期性变化长度的影响。由于海尔贝克排布要求相邻磁铁的磁化方向垂直，由图 4(b)建立的几何仿真模型可知，磁铁磁化方向周期性变化长度为中心磁铁宽度与两侧磁铁高度的和，另外，单个磁铁的磁场受到空芯电磁铁线圈内径、线圈匝数以及线径变化的影响，同时这些参数的变化，也影响着单个磁铁的尺寸变化，即单个磁铁的宽和高。经过上述的理论与模型分析，选取中心磁铁和两侧磁铁的空芯电磁铁线圈内径、线圈匝数、线径以及高度，作为 4 个“因素”，为降低试验次数，两种磁铁的 4 个“因素”分别取 3 个数值作为“水平”。中心磁铁的参数水平如表 1 所示，由参数水平表设计的正交试验如表 2 所示。按照表中设计的参数进行有限元仿真，提取每次仿真得到的垂直磁感应强度作为优化指标。探究试件表面磁通密度分布规律，结合正交试验的方法，提高海尔贝克式排布磁铁阵列在试件表面激发垂直方向上的磁场强度。

表1 中心磁铁参数水平表

Table 1 Level table of central magnet parameters

水平	线圈内径/mm	匝数/匝	线径/mm	高度/mm
1	10	900	0.3	40
2	15	1 800	0.4	45
3	20	2 700	0.5	50

表2 中心磁铁正交试验表

Table 2 Orthogonal test table of central magnet

序号	线圈内径/mm	匝数/匝	线径/mm	高度/mm	磁场密度/T
1	10	900	0.3	40	0.056 2
2	10	1 800	0.4	45	0.098 1
3	10	2 700	0.5	50	0.125 6
4	15	900	0.4	50	0.044 0
5	15	1 800	0.5	40	0.099 5
6	15	2 700	0.3	45	0.142 9
7	20	900	0.5	45	0.045 6
8	20	1 800	0.3	50	0.084 4
9	20	2 700	0.4	40	0.142 0

表 3 正交试验结果分析

Table 3 Analysis of orthogonal experiment results

水平	线圈内径/mm	匝数/匝	线径/mm	高度/mm
k_1	0.093 3	0.048 6	0.094 5	0.099 2
k_2	0.095 5	0.094 0	0.094 7	0.095 5
k_3	0.090 7	0.136 8	0.090 2	0.084 7

正交试验结果分析如表 3 所示, k_1 、 k_2 、 k_3 分别对应所选取的 3 个因素在相同水平下磁场强度的算术平均值, 在 k_1 、 k_2 、 k_3 中选取最大值, 即为该因素所对应的最优参量, 因此中心磁铁的最优组合为线圈内径 15 mm, 线圈匝数 2 700 匝, 线圈直径 0.4 mm, 线圈高度 45 mm。由 k_1 、 k_2 、 k_3 的值可以计算出中心磁铁各水平的极差 R , 极差越大对中心磁铁垂直磁场强度的影响程度越大, 因此选取各个因素对于中心磁铁磁场强度的影响程度排序为线圈匝数>高度>线圈内径>励磁线圈线径。

3.2 两侧磁铁结构参数优化

在选定了最优的中心磁铁的参数后, 对两侧磁铁的参数, 及形成海尔贝克式排布的电磁铁 EMAT 结构进行参数优化, 参数水平如表 4 所示, 由参数水平表设计的正交试验如表 5 所示。

表 4 两侧磁铁参数水平表

Table 4 Parameter level table for side magnets

水平	线圈内径/mm	匝数/匝	线径/mm	高度/mm
1	10	900	0.3	40
2	15	1 800	0.4	45
3	20	2 700	0.5	50

表 5 两侧磁铁正交试验表

Table 5 Orthogonal test Table for side magnets

序号	线圈内径/mm	匝数/匝	线径/mm	高度/mm	磁场密度/T
1	10	900	0.3	40	0.172 6
2	10	1 800	0.4	45	0.198 3
3	10	2 700	0.5	50	0.209 2
4	15	900	0.4	50	0.167 0
5	15	1 800	0.5	40	0.197 0
6	15	2 700	0.3	45	0.230 5
7	20	900	0.5	45	0.168 5
8	20	1 800	0.3	50	0.196 5
9	20	2 700	0.4	40	0.228 0

正交试验结果分析如表 6 所示, k_1 、 k_2 、 k_3 分别对应所选取的 3 个因素在相同水平下磁场强度的算术平均值, 在 k_1 、 k_2 、 k_3 中选取最大值, 即为该因素所对应的最优参量, 因此两侧磁铁的最优组合为线圈内径 15 mm, 线圈匝数 2 700 匝, 线圈直径 0.3 mm, 高度 40 mm。由 k_1 、 k_2 、 k_3 的值可以计算出两侧磁铁各水平的极差 R , 极差越大对海尔贝克排布 EMAT 垂直磁场强度的影响程度越大, 因此选取各个因素对于海尔贝克排布 EMAT 磁场强度的影响程度排序为线圈匝数>高度>励磁线圈线径>线圈内径。

表 6 正交试验结果分析

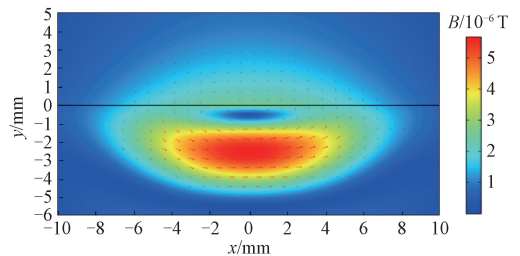
Table 6 Analysis of orthogonal experiment results

水平	线圈内径/mm	匝数/匝	线径/mm	高度/mm
k_1	0.193 4	0.169 4	0.199 9	0.199 2
k_2	0.198 2	0.197 3	0.197 8	0.199 1
k_3	0.197 7	0.222 6	0.191 7	0.190 9

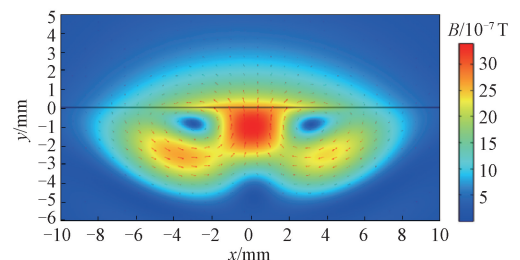
通过正交优化试验, 确定了中心磁铁和两侧磁铁的最优组合参数, 为了保持线圈绕制的整体一致性, 结合正交优化试验结果各个因素对于磁铁磁场强度影响程度排序, 中心磁铁和两侧磁铁均采用线径 0.4 mm 的绕制方式, 可确保整体磁场分布的均匀性和稳定性。

3.3 激励线圈参数优化

常用于激励体波的蝶形线圈和螺旋线圈在通入电流一致的条件下获得的试件表面磁通密度分布情况如图 10 所示。由图可知蝶形线圈相较于螺旋线圈在试件表面感应出的磁通密度分布范围较为集中, 分布在线圈



(a) Flux density distribution excited by butterfly coils



(b) Flux density distribution excited by helical coils

图 10 激励线圈磁场云图

Fig. 10 Magnetic field cloud diagram of excitation coil

中线平行导线周围,即中心矩形区域集中了整个线圈的大部分能量,相较于螺旋线圈感应出的环状电流,蝶形线圈的激励方式更类似于点激励,可与优化后的励磁线圈中心部分进行多物理场耦合激励横波。

经优化后的海尔贝克电磁铁励磁线圈在试件表面产生的偏置磁场与蝶形线圈,经过多物理场耦合,激励的试件内部位移云图如图 11 所示。相较于图 9(a)中螺旋线圈的激励云图,蝶形线圈激励产生的纵波和横波在空间上呈现出较为集中和对称的分布。可以明显看到纵波和横波的波前在试件内部沿特定方向传播,波形清晰,波动较强。螺旋线圈激励产生的纵波和横波在空间上的分布相对更为分散。虽然也能清晰地看到波前,但相较于蝶形线圈,螺旋线圈的波形分布较为广泛且能量集中度较低。蝶形线圈与螺旋线圈试件内部横波位移如图 12 所示,可明显看出蝶形线圈在激励效率上明显优于螺旋线圈,能够在试件内部产生更大的位移。

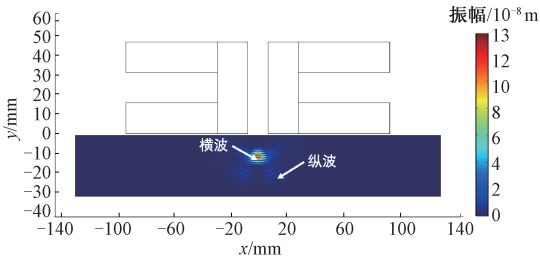


图 11 蝶形线圈 5 μs 时试件内部位移

Fig. 11 Butterfly coil displacement of specimen at 5 μs

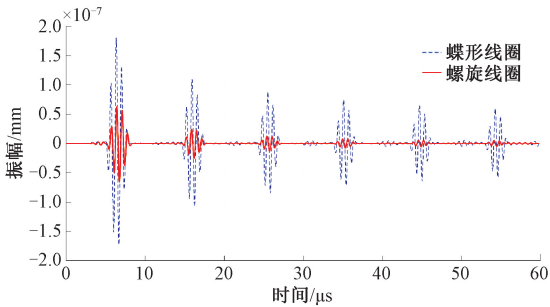


图 12 蝶形线圈与螺旋线圈试件内部横波位移图

Fig. 12 Shear wave displacement of butterfly and spiral coils

优化后的励磁线圈磁通密度分布如图 13 所示,经优化后的励磁线圈,可以产生磁场强度更强且均匀分布的垂直方向磁场,并减小试件表面水平方向上的磁场强度以及分布范围,更利于激励较为纯净的横波。

结合海尔贝克式励磁线圈的优化结果,根据图 13 可知,试件表面垂直磁场的均匀分布范围为 -4 ~ 4 mm。图 14 为蝶形线圈设计参数示意图,为优化螺旋线圈,使传感器激励出模态较为单一的横波,采用正交优化试验的方式,对蝶形线圈设计参数进行优化。其中蝶形线圈的能量主要集中在中心激励区域,所以选择中心激励区

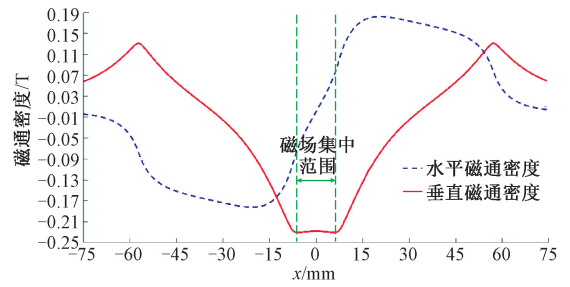


图 13 优化励磁线圈磁通密度分布

Fig. 13 Optimized flux density distribution of excitation coil

域的结构参数作为“因素”。线圈参数包括线径、线圈宽度、线圈间距与匝数。线圈宽度为线径与匝数的乘积再加每匝线圈之间的线圈间距。为简化正交试验过程,选用线圈宽度、线圈间距和匝数作为“因素”,每个“因素”选取 3 个数值作为“水平”。建立蝶形线圈参数水平如表 7 所示,按表 8 开展正交试验仿真。并以横波与纵波在试件内部一次回波幅值的比值作为评价标准,对线圈设计参数进行优化,使传感器激励出模态较为单一的横波。

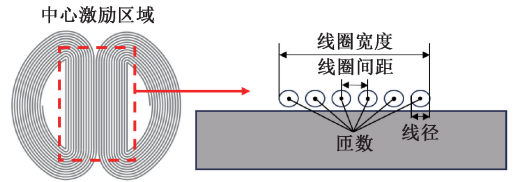


图 14 蝶形线圈设计参数示意图

Fig. 14 Design parameter schematic diagram of butterfly coil

表 7 蝶形线圈参数水平表

Table 7 Parameter level table of butterfly coil

水平	线圈宽度/mm	线圈间距/mm	匝数
1	7	0.1	9
2	8	0.2	18
3	9	0.3	36

表 8 蝶形线圈正交试验表

Table 8 Orthogonal test table of butterfly coil

水平	线圈宽度/mm	线圈间距/mm	匝数	幅值比
1	7	0.1	9	15.30
2	7	0.2	18	16.72
3	7	0.3	36	15.65
4	8	0.1	18	14.67
5	8	0.2	36	15.40
6	8	0.3	9	15.38
7	9	0.1	36	13.07
8	9	0.2	9	14.30
9	9	0.3	18	13.95

表 9 给出了正交试验结果分析。由表 9 可知,蝶形线圈参数设计的最佳组合为,线圈宽度 7 mm,线圈间距 0.2 mm,线圈匝数为 18 匝。此参数组合纵横波比值为 16.72。分析各因素的极差结果可知,线圈宽度是影响实验结果的最重要因素,其次是线圈间距,最后是匝数。根据这一分析,可以优先考虑调整线圈宽度来优化实验结果。

表 9 正交试验结果分析

Table 9 Analysis of orthogonal experiment results

水平	线圈宽度/mm	线圈间距/mm	匝数
k ₁	15.89	14.35	14.99
k ₂	15.15	15.47	15.11
k ₃	13.77	14.99	14.71

4 实验验证

传感器励磁线圈采用自粘纯铜导线绕制,保证传感器线圈一致性的同时,便于整体结构的固定。线圈中心采取尼龙材料由 3D 打印工艺制成,可在检测过程承受 173℃ 的高温,确保传感器整体结构的稳定性。传感器实物如图 15 所示。

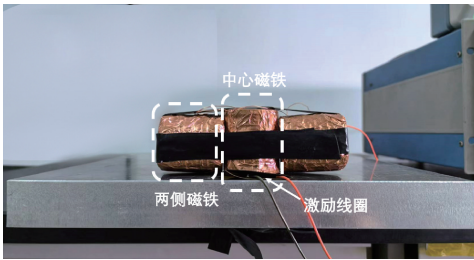


图 15 EMAT 实物图

Fig. 15 Picture of EMAT

为验证海尔贝克式电磁铁 EMAT 的性能,选用 500 mm×400 mm×30 mm 尺寸的铝板作为被测试件。搭建如图 16 所示实验平台,海尔贝克式电磁铁 EMAT 以及体波探头分别布置于试件的上下表面。励磁线圈采用大功率直流稳压电源进行供电,使其产生稳定的偏置磁场。通入励磁线圈的电压为 600 V,实验前测得海尔贝克式电磁铁 EMAT 励磁线圈的直流阻抗为 150 Ω。蝶形线圈中通入中心频率 5 MHz 经汉宁窗调制的 5 周期正弦信号。传感器采用一激一收的方式在铝板上进行试验。选用中心频率 5 MHz 的压电体波探头,采集试件底部接收到的信号回波。

RPR-4000 高能脉冲激励接收仪与激励线圈相连,为传感器提供高能脉冲信号,数字示波器与 RPR-4000 以及压电体波探头相连,用于显示和存储波形。

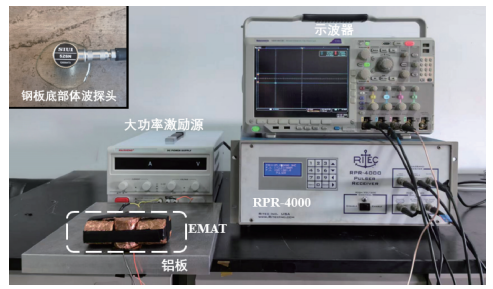
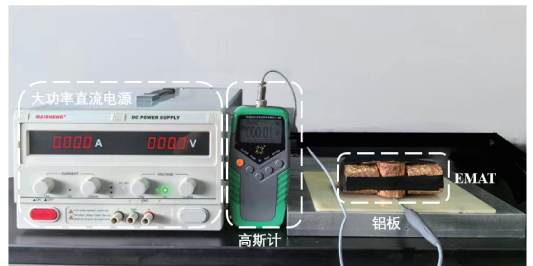


图 16 实验平台

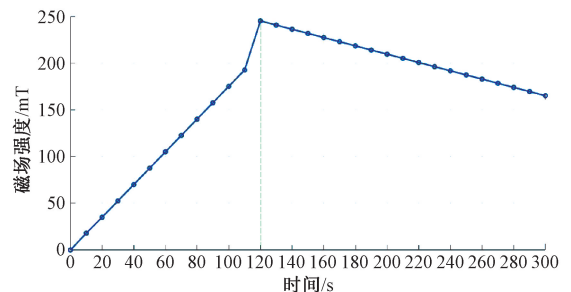
Fig. 16 Experimental platform

在实验过程中。考虑到传感器通电发热对励磁效果的可能影响,设计了一系列实验来解决这个问题。由于实验设备仅有直流大功率电源,通过控制通电时间并使用红外测温枪监控线圈发热温度,以评估其对励磁效果的影响。实验使用的线圈是由环氧树脂粘接的自粘导线绕制加工而成,因此必须控制发热温度在环氧树脂的熔点 130℃ 以下。通过红外测温枪检测通电后励磁线圈的温度,发现通电 5 min 时,励磁线圈温度升至 135℃。为尽量补偿通电时发热对励磁磁场强度的影响,利用高斯计分别测量了通电时间为 10~300 s 内的磁通密度。每次通电后,均将传感器温度降至 21℃ 后再次进行实验。实验平台搭建如图 17(a) 所示,磁通密度随通电时间变化的曲线如图 17(b) 所示。图 17(b) 显示了磁通密度随通电时间变化的曲线。可以观察到,在通电约 120 s 时,磁场强度达到峰值,然后逐渐下降。这一结果表明,传感



(a) 磁通密度测量实验平台

(a) Flux density distribution excited by butterfly coils



(b) 磁通密度随通电时间的变化曲线

(b) Curve of magnetic flux density variation over time during electrification

图 17 温度探究实验

Fig. 17 Temperature investigation experiment

器发热确实对磁场强度产生了影响。且需采集通电时间100~220 s 时间内的回波幅值进行分析。

由于原始信号是一种包含多次反射的超声回波信号。原始信号如图 18 所示,从图中可以明显分辨出幅值较大的波包,但由于纵波的幅值较小且与横波在时域上有混叠现象,因此需要通过特定的信号处理方法来分离和分析这些混叠信号。为了准确提取和分析信号中的不同波包,尤其是幅值较小且与其他波包混叠的纵波信号,采用了希尔伯特变换、包络提取以及波包分离的方法。通过希尔伯特变换和包络提取,可以更容易地分辨出信号中的波包峰值位置。经过信号包络和峰值提取的波形如图 18 所示。提取和处理这些波包信号后,可更清晰地分析和研究不同波包的信息,分析对应的超声模式。

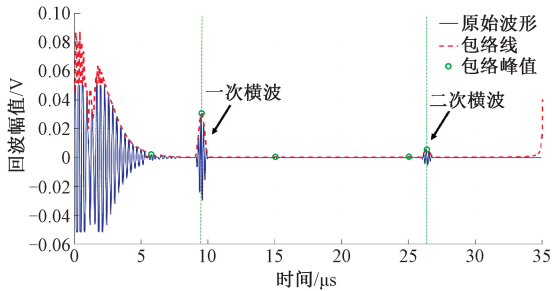


图 18 原始信号与包络提取结果

Fig. 18 Original signal and envelope extraction result

通过希尔伯特变换和包络提取,除激励信号所产生的串扰信号外,可分辨出明显的回波波包,利用图中两个连续波包的时间差,通过渡越时间法计算图中波包的波速,第 1 个波包和第 2 个波包之间的波速为 3 243 m/s,与理论波速 3 120 m/s 的相对误差分别为 3.94%。由此可以判断:在 9.02 μs 处,第 1 个小波包为横波传播到试件底面,体波探头接收到的 1 次横波。在 27.52 μs 处的波包为 2 次横波。

从原始信号中分离出纵波信号,经过平滑处理后,成功提取出一次、二次、三次纵波的位置和幅值,如图 19 所示。为进一步验证激发模式,采用渡越时间法,计算相邻波包的波速分别为 6 462 m/s 和 6 014 m/s,与理论值的相对误差分别为 4.46% 和 2.78%。由此可以判断:在 5.76 μs 处,第 1 个小波包为纵波传播到试件底面,体波探头接收到的一次纵波,在 15.01 μs 处的波包为二次纵波,在 25.02 μs 处的波包为三次纵波。

提取实验结果中一次横波和一次纵波的回波幅值结果,得出横纵波幅值比为 15.25 倍,与仿真结果的相对误差为 4.31%。

通过分析,以上横波和纵波波速误差以及幅值比误差均小于 5%,在可接受范围内。实验结果产生的误差相较于仿真结果明显增大,考虑可能与检测试件铝板的材

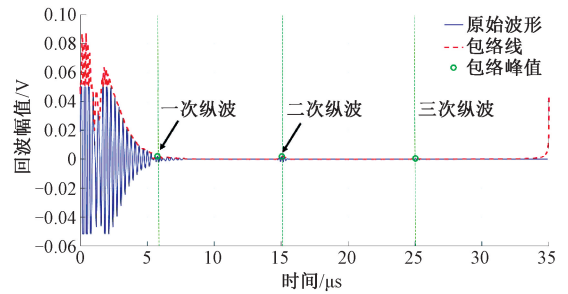


图 19 试件底部接收的纵波信号

Fig. 19 Shear wave signal received at the bottom of the specimen

料均匀性、材料参数测量误差以及传感器检测升温带来的影响有关。

实验结果显示,海尔贝克式电磁铁 EMAT 的励磁线圈排布,能够有效抑制超声波激励位置水平磁场的产生,并提高均匀垂直磁场的激励强度,实现单一横波模式的激励。

5 结 论

针对传统的永磁铁 EMAT,结合脉冲电磁铁 EMAT 以及海尔贝克式排布永磁铁 EMAT 的特点,提出海尔贝克式电磁铁 EMAT 设计方法。采用正交试验的方法优化了传感器结构设计参数,采用仿真和实验相结合的方式,对优化后的传感器性能进行验证,所得结论如下:

1) 在中心磁铁的设计和海尔贝克式电磁铁 EMAT 激励线圈的排布优化过程中,以线圈在试件表面产生的垂直方向最大磁通密度作为评价标准。通过分析发现,线圈匝数对励磁效果的影响最大。因此,为了更好地增大励磁线圈激发的磁场强度,提高传感器的换能效率,应尽量增大线圈匝数。具体设计中,可以通过增加线圈的匝数来显著提升磁场强度,从而优化传感器的性能。

2) 针对激励线圈类型选择和线圈宽度优化的结果表明,蝶形线圈相较于传统的螺旋线圈,在试件表面产生的磁场更为均匀,并且在集肤深度内感应出的涡流电流密度更加集中。尤其是当中心平行导线宽度及小于中心磁铁单元内径时,蝶形线圈能够激励出模式较为单一的横波。因此,在优化设计中,应优先选择蝶形线圈,并合理控制中心平行导线的宽度,以确保在试件表面产生均匀的磁场和集中的涡流电流密度,从而提高传感器的检测效果。

在传感器性能验证的实验过程中,由于励磁线圈通电后会在传感器内部感应出极大的涡流,导致励磁线圈发热严重,阻抗升高,致使线圈内部电流减小,削弱了励磁线圈激发磁场强度的大小,导致传感器换能效率降低,

超声回波幅值减小,后续将考虑在传感器外部以及内部装配散热系统,最大程度上减轻由于线圈升温对于传感器整体检测效率的影响。

参考文献

- [1] LIU Z H, HUO ZH L, LI AI L, et al. Development of an omnidirectional SH₀ mode electromagnetic acoustic transducer employing a circumferential periodic permanent magnet array [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7691-7701.
- [2] 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.
- [3] LIU H B, LIU T R, LI Y P, et al. Uniaxial stress in-situ measurement using EMAT shear and longitudinal waves: Transducer design and experiments [J]. *Applied Acoustics*, 2021, 175(1): 107781.
- [4] ROSLI M H, EDWARDS R S, FAN Y. In-plane and out-of-plane measurements of Rayleigh waves using EMATs for characterising surface cracks [J]. *NDT & E International*, 2012, 49(7): 1-9.
- [5] HERNANDEZ-VALLE F, DIXON S. Pulsed electromagnetic EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2011, 53(2): 96-99.
- [6] 刘增华, 谢穆文, 钟栩文, 等. 超声导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 electromagnetic acoustic transducers for ultrasonic guided waves inspection [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(2): 192-202.
- [7] LIU Z H, HU Y N, XIE M W, et al. Development of omnidirectional A₀ mode EMAT employing a concentric permanent magnet pairs with opposite polarity for plate inspection [J]. *NDT & E International*, 2018, 94: 13-21.
- [8] ZHANG P Y, LIU Z H, GUO Y H, et al. Development of dual-main excitation mechanism modes electromagnet EMAT for testing ferromagnetic materials [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2023: 1-21.
- [9] MURAYAMA R, MAKIYAMA S, KODAMA M, et al. Development of an ultrasonic inspection robot using an electromagnetic acoustic transducer for a Lamb wave and an SH-plate wave [J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1-9): 825-829.
- [10] XIE CH X, LIU T H, PEI C X, et al. A new longitudinal mode guided-wave EMAT with periodic pulsed electromagnets for non-ferromagnetic pipe [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331(4): 112991.
- [11] LIU S ZH, CHAI K, ZHANG CH, et al. Electromagnetic acoustic detection of steel plate defects based on high-energy pulse excitation [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16): 5534.
- [12] 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): 3943-3950.
- ZHAI G F, LIANG B, DENG CH R, et al. Design of high temperature resistant electromagnetic acoustic transducer with double coil structure [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(11): 3943-3950.
- [13] ZHAI G F, WANG K C, WANG Y K, et al. Modeling of Lorentz forces and radiated wave fields for bulk wave electromagnetic acoustic transducers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(5): 054901.
- [14] 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. Design of trapezoidal magnetic concentrator for electromagnetic ultrasonic transducer based on orthogonal test method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instruments*, 2023, 37(12): 98-106.
- [15] 张义涛, 程树云, 陆铭慧, 等. 基于偏置磁场 EMAT 表面波换能器效率的分析 [J]. *无损检测*, 2023, 45(11): 59-66.
- ZHANG Y T, CHENG SH Y, LU M H, et al. Analysis of efficiency of EMAT surface wave transducer based on bias magnetic field [J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(11): 59-66.
- [16] 蔡智超, 李毅博. 基于 Halbach 阵列电磁超声纵波换能器优化设计 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(21): 4408-4417.
- CAI ZH CH, LI Y B. Optimum design of electromagnetic acoustic longitudinal wave transducer based on Halbach array [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(21): 4408-4417.
- [17] 石文泽, 陈巍巍, 卢超, 等. 基于脉冲压缩技术的金属锻件缺陷跑道线圈 EMAT 检测方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 86-97.

SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Research on racetrack coil EMAT detection technology of metal forging defect based on the pulse compression technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 86-97.

- [18] 岑鑫, 潘高, 王雪梅, 等. 横波测厚电磁超声换能器的优化设计及试验研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 176-182.

CEN X, PAN G, WANG X M, et al. Optimal design and experimental study of shear wave thickness measuring electromagnetic ultrasonic transducer [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 176-182.

作者简介



刘增华 (通信作者), 2006 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为无损检测和评估、结构健康监测、信号处理和智能传感器技术。

E-mail: liuzenghua@bjut.edu.cn

Liu Zenghua (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2006 from Beijing University of Technology. Now he is a professor in Beijing University of Technology. His main research interests include nondestructive testing and evaluation, structural health monitoring, signal processing and smart sensors technology.



郑坤松, 2021 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: xylzks@emails.bjut.edu.cn

Zheng Kunsong received his B. Sc. degree in 2021 from Beijing University of Technology.

Now he is a M. Sc. student in Beijing University of Technology. His main research interests include electromagnetic non-destructive testing.



朱艳萍, 2016 年于吉林大学获得学士学位, 2022 年于上海交通大学获得博士学位, 现为北京工业大学讲师, 主要研究方向为无损检测和结构健康监测。

E-mail: zhuyp@bjut.edu.cn

Zhu Yanping received her B. Sc. degree in 2016 from Jilin University, and her Ph. D. degree in 2022 from Shanghai Jiao Tong University. Now she is a lecturer in Beijing University of Technology. Her main research interests include nondestructive testing and structural health monitoring.



郭彦弘, 2016 年于南昌航空航天大学获得学士学位, 2020 年于南昌航空航天大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向电磁无损检测。

E-mail: guoyanhong@emails.bjut.edu.cn

Guo Yanhong received his B. Sc. degree in 2016 from Nanchang Hangkong University, received his M. Sc. degree in 2020 from Nanchang Hangkong University. Now he is a Ph. D. student in Beijing University of Technology. His main research interests include electromagnetic non-destructive testing.



何存富, 1985 年于太原理工大学获得学士学位, 1990 年于华中科技大学获得硕士学位, 1996 年于清华大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为微磁材料评估方法和超声导波检测技术。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

He Cunfu received his B. Sc. degree in 1985 from Taiyuan University of Technology, received his M. Sc. degree in 1990 from Huazhong University of Science and Technology, received his Ph. D. degree in 1996 from Tsinghua University. Now he is a professor in Beijing University of Technology. His main research interests include micromagnetic material evaluation methods and ultrasonic guided waves inspection technology.