

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514341

曲面型双交流磁致伸缩 SH 导波换能器设计*

周红军^{1,2}, 涂 君^{1,3}, 宋旂旒⁴, 宋小春^{1,3}

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 湖北汽车工业学院汽车智能制造学院 十堰 442002; 3. 湖北工业大学现代制造质量工程湖北省重点实验室 武汉 430068; 4. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘 要:传统电磁超声一般采用永磁体或者直流电(包括单向脉冲电流和单向正弦电流)提供偏置磁场,永磁体换能器属于刚性检测,在曲面对象原位检测中受限,直流偏置磁场一般数值较大实验条件苛刻。为此,提出了一种曲面双交流磁致伸缩换能器,采用交流电提供偏置磁场,建立双交流磁致伸缩激励超声波模型。有限元分析显示,换能器可以激励单一模态 SH 导波,且与缺陷作用后未发生模态转化;随着曲率半径的改变,曲面换能器激励磁场标准差更小,信号幅值波动更小,以磁场强度最大值的 95% 为基准衡量其磁场均匀性,曲面型换能器均匀区域长为 22~24.34 mm,而平面型电磁声换能器(EMAT)的均匀区域在 17.32~20.29 mm;此外,正交实验结果显示,换能器结构参数对幅值影响程度为:层数>匝数>长度>线径>高度。搭建双交流磁致伸缩水平剪切(SH)导波系统,在磁化电流为 12.3 A 磁化线圈匝数为 40 时,曲面型换能器缺陷信号幅值比平面型换能器提高 18.64%,磁化电流增加至 30 A 时幅值提高 35.71%,磁化线圈匝数增加至 100 匝时幅值提高 85.59%。不同曲率半径重复实验显示,随着曲率半径的增加两类换能器幅值均逐渐增加,曲面型换能器幅值整体误差更小,波动更小,相同曲率半径检测对象,曲面型换能器幅值更大。验证了双交流磁致伸缩激励 SH 导波的可行性和曲面对象缺陷检测的有效性。

关键词: 电磁超声;双交流;曲面检测;磁致伸缩;SH 导波

中图分类号: TH165+.4 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design of curved surface type dual AC magnetostrictive SH guided wave transducer

Zhou Hongjun^{1,2}, Tu Jun^{1,3}, Song Yini⁴, Song Xiaochun^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Automotive Intelligent Manufacturing, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China; 3. Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 4. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Conventional electromagnetic acoustic transducers (EMATs) typically employ either permanent magnets (PMs) or direct current (DC) including unidirectional pulse currents and unidirectional sinusoidal currents, to provide the required bias magnetic field. However, PM-based transducers are inherently rigid, which limits their applicability for in-situ inspection of curved structures, while DC bias fields generally require large current magnitudes and impose stringent experimental conditions. To address these limitations, a curved dual-AC magnetostrictive transducer is proposed, which generates the bias magnetic field using alternating current. A theoretical model for ultrasonic excitation based on the dual-AC magnetostrictive mechanism is established. Finite element analysis demonstrates that the proposed transducer can excite a pure shear horizontal (SH) guided wave mode without modal conversion after interacting with defects. As the curvature radius increases, the curved transducer exhibits a smaller standard deviation of the excitation magnetic field and lower signal amplitude fluctuation. Using 95% of the peak magnetic field intensity as the criterion for field uniformity, the uniform magnetic field region of the curved transducer ranges from 22 to 24.34 mm, compared with 17.32 to 20.29 mm for the planar electromagnetic acoustic transducer (EMAT). Furthermore, orthogonal experimental results indicate that the influence of structural

收稿日期: 2025-07-31 Received Date: 2025-07-31

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0605600)、湖北省重点研发计划(2024BAB065)项目资助

parameters on signal amplitude follows the order: number of layers > number of turns > length > wire diameter > height. A dual-AC magnetostrictive SH guided wave system is subsequently constructed. Experimental results indicate that when the magnetization current is 12.3 A with 40 coil turns, the defect signal amplitude of the curved transducer is enhanced by 18.64% compared to that of the planar transducer. Increasing the magnetization current to 30 A yields an amplitude increase of 35.71%, and further increasing the number of turns in the magnetization coil to 100 results in an amplitude enhancement of 85.59%. Repeated experiments with different curvature radii show that the signal amplitude of both transducers increased with curvature radius, while the curved transducer exhibited smaller overall errors and amplitude fluctuations. These results confirm the feasibility of dual-AC magnetostrictive excitation for SH guided waves and demonstrate the effectiveness of the proposed curved transducer for defect detection on curved surfaces.

Keywords: electromagnetic acoustic transducer; dual alternating current; curved surface detection; magnetostriction; SH guided waves

0 引 言

电磁声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 可以通过结构变化灵活激励水平剪切 (shear horizontal, SH) 波^[1-3]、兰姆波^[4-5]、表面波^[6-7]、纵波和横波^[8-10]等不同类型超声波,其不需要耦合剂,在各类特殊应用场合显示出巨大的应用前景^[11-12]。

在导波检测中,SH0 导波具有非频散特性,干扰信号少,成为常见检测波形。利用 EMAT 激励 SH 波的原理主要分为洛伦兹力、磁致伸缩力和磁化力这 3 种形式,基于洛伦兹力原理,Sui 等^[13]采用柱形周期永磁体 (periodic permanent magnet, PPM) 加螺旋线圈激励全向 SH0 导波,用于板类零件结构健康监测;Liu 等^[14]在普通柱形永磁体和螺旋线圈中间加入聚磁器,提高了缺陷监测能力和模态选择性;Shankar 等^[15]采用平面交错 PPM-EMAT 激励 SH 导波,实现超声波的转向、聚焦和去聚焦等选择性波束成形效果;Sun 等^[16]采用扇形 PPM 加曲折线圈实现点聚焦 SH 导波激励,并采用正交实验法对换能器进行优化;Gautam 等^[17]采用 PPM 加 V 型线圈激励 SH 波,有效降低了旁瓣的产生。基于磁致伸缩原理,刘增华等^[18]采用柱形永磁体加径向回折线圈激励全向 SH0 导波,实现不同缺陷的成像检测;Liu 等^[19]采用扇形永磁体和扇形线圈激励方向可调的 SH0 导波,并深入研究了扇形永磁体数量和方向对声场分布和指向性的影响;Puthusseri 等^[20]采用阶梯磁致伸缩贴片和螺旋管激励 SH 导波,利用 SH1 截至特性估算样品最低残余厚度。磁化力一般会与洛伦兹力和磁致伸缩力共同作用,杨理践等^[21]建立磁化力、磁致伸缩力和洛伦兹力作用下磁场-位移-波叠加数学模型,通过控制导线间距和延迟时间实现低阶扭转模态单向传播;刘素贞等^[22]考虑磁化力等 3 种力同时作用时,缺陷深度与反射系数、透射系数的关系;Parra-Raad 等^[23]在二维有限元模型中估算 3 种激励机制 (洛伦兹力、磁化力和磁致伸缩力) 的表面载荷。由于磁化力相对洛伦兹力和磁致伸缩力差多个数量级,所以常忽略磁化力的影响。上述 3 种原理的换能器均借助磁铁来提供

偏置磁场,因磁铁的存在,此类检测属于刚性检测。在对曲面对象 (如油气管道和风力机叶片等) 柔性检测时,常常会出现信噪比降低、检测能力下降等问题。所以,对换能器的曲面检测能力要求日益提高。

目前,具备曲面检测能力的换能器相关研究较少。一种方式是无需永磁体提供偏置磁场,仅采用单线圈结构激励声波,Tkocz 等^[24]在跑道线圈中通入 1.75 kA 激励电流,该电流在空间产生交变磁场,在零件内部产生涡流,两者相互作用激励洛伦兹力产生超声波;刘素贞等^[25]在曲折线圈中通入 1.7 kA 交变电流,基于洛伦兹力原理激励零阶模态导波,研究其频率特性和提离特性;Rieger 等^[26]采用两个紧密排列线圈通 1 kA 电流实现单向兰姆波的激励,并研究了其指向性、声场特性和边沿检测效果;Rieger 等^[27]通过在线圈中通入 1 kA 的预磁化脉冲电流,实现仅线圈式超声波激励和接收。另一种方式是采用磁化线圈和涡流线圈的双线圈结构,磁化线圈通入大电流以产生偏置磁场,涡流线圈通入脉冲电流以产生涡流,Pei 等^[28]在螺旋线圈中通入 135 A 磁化电流产生偏置磁场激励超声波,用于铝管曲面检测;Zhang 等^[29]在跑道线圈加载 140 A 磁化电流提供偏置磁场,结合相控阵原理实现曲面检测,同时提高了信噪比;Liu 等^[30]在螺旋管中加载 276 A 方波型长脉冲产生偏置磁场,激励纵向模态导波对壁厚减薄和局部减薄进行定量研究,结果显示回波大小与缺陷面积呈线性相关;Xie 等^[31]将加载 100 A 电流的磁化线圈间隔缠绕于柱状支架外侧,与涡流线圈配合在管道内激励纵向模态导波,实现不锈钢管缺陷检测和信号幅值提升;Zhang 等^[32]在跑道线圈上加入高磁导率磁性阵列,使得涡流线圈下方磁感线更集中磁通密度更大,信号增强约 82.9%;Liang 等^[33]在螺旋式磁化线圈加载 2.5 kA 单向正弦长脉冲电流激励超声波,对线圈配置形式进行了优化,并研究了温度对横波和纵波的影响;Deng 等^[34]在激励线圈和接收线圈中加载 700 V 以上电压,并加入阵列单元,实现信号的增强和曲面管道的脱粘缺陷检测。上述具备曲面检测能力的换能器在特定条件下取得了一定效果,但是所需电流均为数百安培以上,实验条件较为苛刻。

针对复杂零件曲面的检测需求,若采用常规探头进行刚性检测,信噪比通常会降低;此外,大电流磁化实验条件难以满足,且发热问题也较为严重。提出一种双交流仅线圈式磁致伸缩换能器,通过建立双交流磁致伸缩模型,分析缺陷类型和曲率半径对信号的影响,进而采用正交实验法对换能器尺寸参数进行优化设计。最后在 30 A 磁化电流下激励 SH0 导波,对曲面 EMAT 检测特性进行实验研究,为后续不规则变曲率柔性检测换能器研究奠定基础。

1 双交流磁致伸缩模型

磁性材料在外加磁场的作用下,内部磁畴随之发生转动,导致其长度或体积发生微小变化的现象称为磁致伸缩效应,磁致伸缩导波正是利用该效应的微小振动产生超声波用于缺陷的无损检测^[35]。

在自由应力状态下,仅考虑磁场变化引起的应力和应变,铁磁材料的机械特性与磁特性满足式(1)和(2),即:

$$\mathbf{S}^{\text{Ms}} = -\mathbf{d}^{\text{Ms}} H_d \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{\text{Ms}} = -\mathbf{e}^{\text{Ms}} H_d \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}^{\text{Ms}}$ 和 $\boldsymbol{\sigma}^{\text{Ms}}$ 分别表示应变矩阵和应力矩阵; $\mathbf{d}^{\text{Ms}}$ 和 $\mathbf{e}^{\text{Ms}}$ 分别表示压磁矩阵和逆压磁矩阵; H_d 表示涡流线圈(即曲折线圈)动态磁场。

联立式(1)和(2)和应力应变关系式 $\boldsymbol{\sigma}^{\text{Ms}} = -\mathbf{c}_{ij} \mathbf{S}^{\text{Ms}}$, 可得:

$$\mathbf{e}^{\text{Ms}} = \mathbf{d}^{\text{Ms}} \mathbf{c}_{ij} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{c}_{ij}$ 为材料刚度矩阵。

曲折线圈在被测试件中的磁场强度为:

$$H_d = \frac{B_d}{\mu_r} \quad (4)$$

式中: μ_r 为可逆磁导率。

传统磁致伸缩 SH 导波换能器一般由永磁体和曲折线圈组成,如图 1 所示。

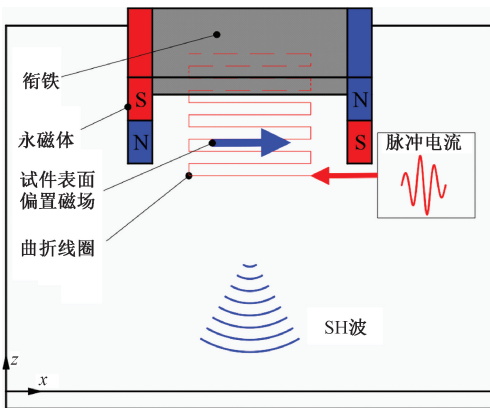


图 1 传统磁致伸缩 SH 导波激励

Fig. 1 Conventional magnetostrictive SH guided wave excitation

联立式(2)~(4)可得磁致伸缩应力,即:

$$T^{\text{Ms}} = -c_{44} \frac{3\varepsilon_M}{H_0} H_d \quad (5)$$

式中: H_0 为偏置磁场强度; ε_M 为磁致伸缩量。

当采用线圈磁化时,根据毕奥-萨伐尔定律,磁化电流元 $I_1 d\mathbf{l}$ 在空间点 $P(x, y, z)$ 产生的磁场的大小为:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (6)$$

式中:电流元 $I_1 d\mathbf{l}$ 的位矢为 $\mathbf{r}' = (x', y', z')$; P 点的位矢为 $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 。

单匝线圈在 P 点产生磁场可以等效为 4 条边在 P 点的磁场矢量和,在磁化器中心建立坐标系, z 轴沿磁化器轴线方向,设磁化器高和宽分别为 $2b$ 和 $2c$,磁化线圈匝数为 N 。则磁化器在 P 点的磁感应强度为:

$$B_z^{\text{total}} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \left[\int_{-c}^c \left(\frac{(y-b)}{R_{1i}^3} - \frac{(y+b)}{R_{3i}^3} \right) dx' + \int_{-b}^b \left(\frac{(x-c)}{R_{2i}^3} - \frac{(x+c)}{R_{4i}^3} \right) dy' \right] \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} R_{1i} &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-b)^2 + (z-z'_i)^2}; \\ R_{2i} &= \sqrt{(x-c)^2 + (y-y')^2 + (z-z'_i)^2}; \\ R_{3i} &= \sqrt{(x-x')^2 + (y+b)^2 + (z-z'_i)^2}; \\ R_{4i} &= \sqrt{(x+c)^2 + (y-y')^2 + (z-z'_i)^2}. \end{aligned}$$

$$\xi_{1i} = \frac{(y-b)}{R_{1i}^3} - \frac{(y+b)}{R_{3i}^3}, \xi_{2i} = \frac{(x-c)}{R_{2i}^3} - \frac{(x+c)}{R_{4i}^3},$$

当磁化电流为 $I_1 = A_1 \sin(2\pi f_1 t)$ 时, P 点磁场强度为:

$$H_A = \frac{\mu_0 A_1 \sin(2\pi f_1 t)}{4\pi\mu_r} \sum_{i=1}^N \left[\int_{-c}^c \xi_{1i} dx' + \int_{-b}^b \xi_{2i} dy' \right] \quad (8)$$

式中: μ_0 为真空磁导率,此时磁致伸缩剪应力为:

$$T_A^{\text{Ms}} = -c_{44} \frac{3\varepsilon_M}{H_A} H_d \quad (9)$$

由式(5)、(9)可知,传统磁致伸缩 SH 导波的磁致伸缩应力影响因素中,刚度系数 c_{44} 、磁致伸缩量 ε_M 、偏置磁场 H_0 均为定值,涡流线圈产生动态磁场 H_d 是唯一变量, H_d 一般较小,粒子振动有限,超声波波源能量较小。该研究采用交流磁化器提供交变磁场,静态偏置磁场 H_0 成为交变偏置磁场 H_A ,磁致伸缩应力 T_A^{Ms} 在交变偏置磁场 H_A 、动态磁场 H_d 和磁致伸缩量 ε_M 共同作用下产生高频振动,激励超声波,如图 2 所示。

2 有限元建模与仿真分析

2.1 有限元建模

双交流 EMAT 的参数和检测对象结构对导波激励、幅值大小、声场传播等特性有着深远影响,选择合适的结

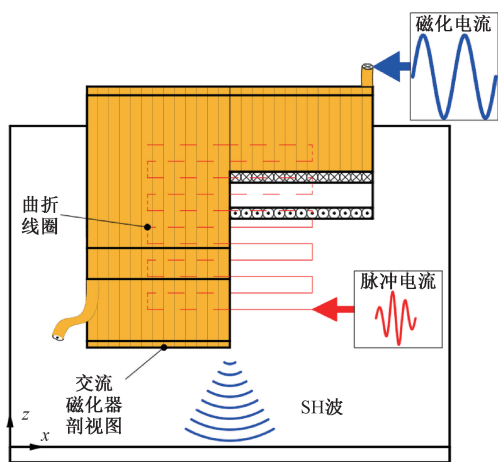


图 2 双交流磁致伸缩 SH 导波激励

Fig. 2 Dual-AC magnetostrictive SH guided wave excitation

构参数可以使换能器效率更高信噪比更好,通过 Comsol 软件建立双交流 EMAT 有限元模型如图 3 所示。

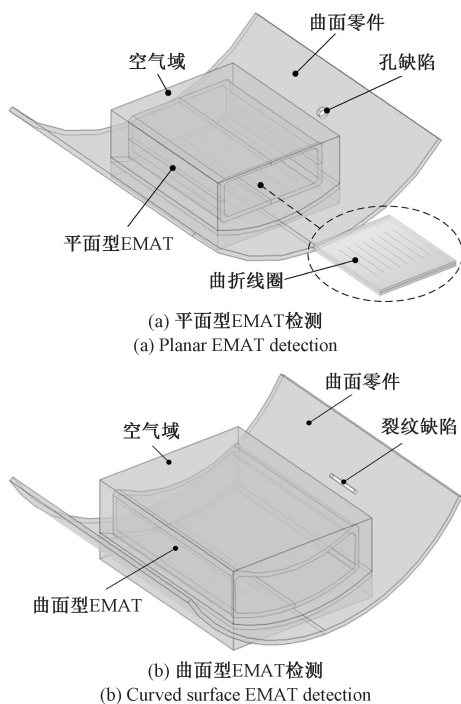


图 3 双交流 EMAT 有限元模型

Fig. 3 Finite element models of the dual-AC EMAT

建立电磁场与固体力学场的三维有限元模型,磁化器由线圈绕制而成,其支撑材料可以选择刚性材料或者柔性材料,外侧方形区域代表空气域,采用若干加载电流的有限长度导线代替曲折线圈,空气域内检测对象称为感应区。选择不同曲率半径的部分管道进行曲面检测,图 3(a)为平面型 EMAT 检测,如图 3(b)所示,曲面型 EMAT 根据待测对象曲率柔性弯曲与其贴合实现曲面检测。

2.2 仿真分析

1) 声波与缺陷作用特性

超声波与缺陷作用后会发生反射与透射,反射波与透射波携带着缺陷重要信息,是缺陷定量检测的依据,然而声波与缺陷作用后可能会发生模态转换,给信号识别带来一定的干扰^[36-37]。采用图 3(b)模拟 SH 波与裂纹和孔缺陷作用,根据惠更斯原理,曲折线圈间距为波长一半时,波的相长干涉使得信号最好,当曲折线圈间距为 3 mm 时,SH 导波波长 $\lambda = 6$ mm,脉冲电流频率设置为 517 kHz,在距离换能器 50 mm 处分别加工 1、0.5 mm 深裂纹以及直径 3 mm 通孔缺陷,在缺陷两侧 15 mm 处检测反射波和透射波信号,结果如图 4 所示。声波信号只有单一模态 SH0 导波,未发生模态转换,1 mm 深裂纹反射信号远大于透射信号,反射波幅值约为透射波 3.2 倍,与直达波相比,能量主要作用于缺陷,0.5 mm 深裂纹透射波幅值略大于反射波,大部分能量透过裂纹;声波与 3 mm 孔作用后主要以透射波形式存在,透射波幅值约为反射波 3.75 倍,与直达波相比,能量损失较严重,这主要与孔的反射面特性有关。

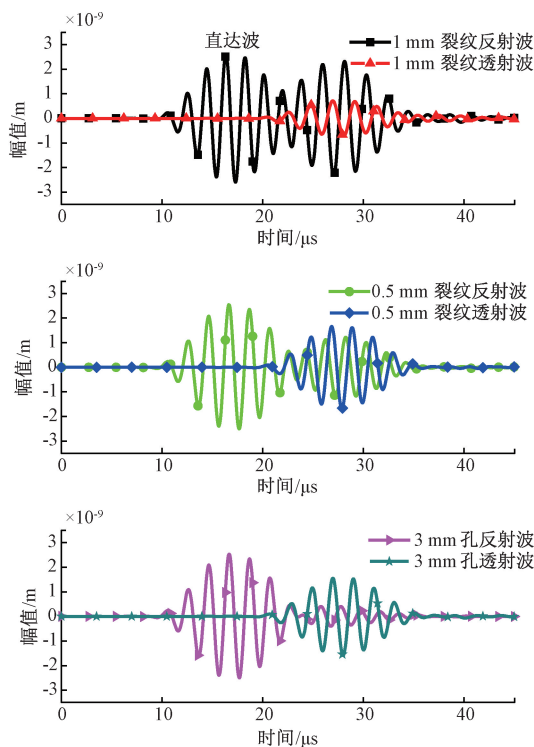


图 4 SH 导波与不同缺陷作用结果

Fig. 4 Interaction results between SH guided waves and different defects

2) 曲率半径影响

在实际应用中不可避免的存在一些曲面检测对象,传统永磁体磁化属于刚性接触无法与曲面零件良好接

触,导致换能效率降低和信号波动。曲面检测能力受到越来越多关注,如图3将曲面零件简化为不同曲率的曲面管道,研究不同曲率半径对换能器性能影响。

考虑到计算资源有限,仿真中取管道一部分作为研究对象,分别采用图3(a)、(b)中平面型 EMAT 和曲面型 EMAT 激励超声波,改变管道曲率半径,提取感应区中线 z 方向的磁场强度如图5(a)所示。相同配置下,随着曲率半径的增加,曲面型 EMAT 和平面型 EMAT 磁场强度都逐渐增加,但是曲面型 EMAT 磁场强度更大,以磁场强度最大值的 95% 为基准衡量其均匀性,曲面型 EMAT 均匀区域长为 22~24.34 mm,而平面型 EMAT 的均匀区域在 17.32~20.29 mm,此外,提取距离线圈中心 8 mm 处 P_1 点磁场强度计算其标准差,不同曲率半径下曲面型 EMAT 标准差约为 955 A/m,而平面 EMAT 标准差约为 1 547.8 A/m,说明曲面型 EMAT 下方感应区磁场更均匀波动更小。

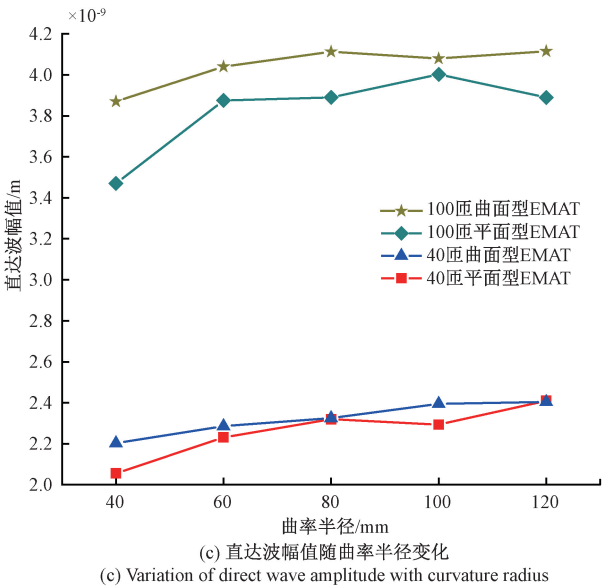


图5 磁场强度和幅值随曲率半径变化

Fig. 5 Variation of magnetic field intensity and wave amplitude with curvature radius

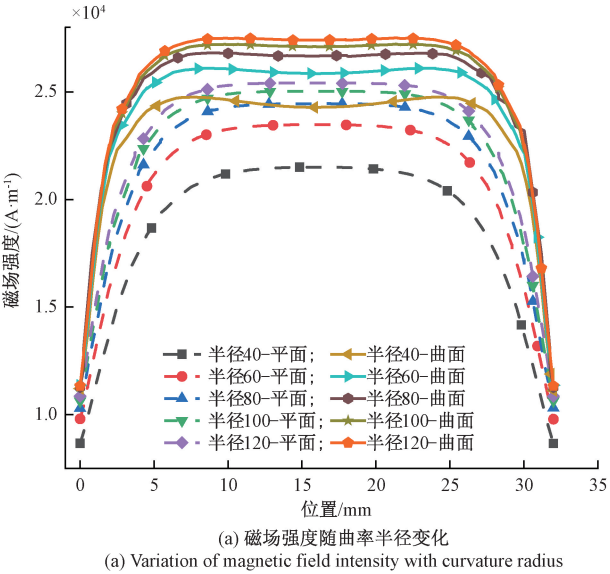
提取感应区磁场强度最大值和距离线圈中心 20 mm 处 P_2 点信号幅值如图5(b)、(c)所示。随着曲率半径的增加,磁场强度最大值和直达波幅值也逐渐增加,曲面型 EMAT 和待测零件贴合更好,磁化器匝数为 100 时曲面型 EMAT 和平面型 EMAT 磁场强度标准差分别为 1 727.9 和 2 759.3 A/m,磁化器匝数为 40 时曲面型 EMAT 和平面型 EMAT 磁场强度标准差分别为 962.1 和 1 393.4 A/m,曲面型 EMAT 磁场强度更大,增长趋势更平缓,波动更小,与图5(a)规律类似。同时磁化器匝数增加时,磁场强度变大,直达波幅值也增强。

3) 磁化器正交实验

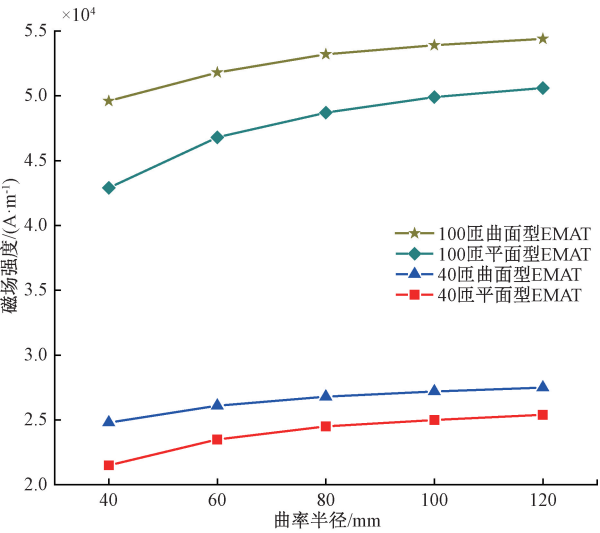
磁化器尺寸变化会改变空间磁场大小和分布,进而影响换能器性能。其中磁化器宽度受到线圈匝数、线圈直径和绕制层数的影响,鉴于有限元分析涉及参数多,运算量大时间长,采用正交实验方法研究磁化器参数对幅值影响^[38]。

磁化器尺寸影响参数主要包括长度、高度、匝数、线径和层数 5 个因素,参数设置需要考虑曲折线圈尺寸和实验条件,如磁化器长度 l_m 和宽度需要覆盖曲折线圈,匝数和层数需要考虑交流电源功率和适用性。选择 4 水平进行分析,以 P_2 点幅值为目标,正交实验组合与仿真结果如表 1 所示。

通过正交实验数据分析,可以得到影响磁化器尺寸的 5 个因素对 P_2 点幅值的影响,各因素水平的幅值平均值如表 2 所示。采用极差分析法来衡量各因素的影响大小,极差越小表示该因素的改变对幅值影响越小,反之则



(a) 磁场强度随曲率半径变化
(a) Variation of magnetic field intensity with curvature radius



(b) 磁场强度最大值随曲率半径变化
(b) Variation of maximum magnetic field intensity with curvature radius

表 1 磁化器正交实验设计

Table 1 Table of orthogonal experimental design for the magnetizer

组合	长 l_m/mm	高 h_m/mm	匝数 N_m	线径 d_m/mm	层数 c_m/mm	幅值 $/10^{-10}\text{ m}$
1	25	15	40	0.5	1	12.62
2	25	20	60	0.8	2	37.33
3	25	25	80	1.0	3	47.79
4	25	30	100	2.0	4	50.71
5	30	15	60	1.0	4	40.66
6	30	20	40	2.0	3	32.09
7	30	25	100	0.5	2	34.50
8	30	30	80	0.8	1	28.90
9	35	15	80	2.0	2	21.59
10	35	20	100	1.0	1	23.11
11	35	25	40	0.8	4	30.02
12	35	30	60	0.5	3	31.80
13	40	15	100	0.8	3	41.51
14	40	20	80	0.5	4	24.71
15	40	25	60	2.0	1	13.68
16	40	30	40	1.0	2	30.01

表 2 正交实验结果分析

Table 2 Analysis of orthogonal experiment results

水平	长 l_m	高 h_m	匝数 N_m	线径 d_m	层数 c_m
1	37.11	29.10	26.19	25.91	19.58
2	34.04	29.31	30.87	34.44	30.86
3	26.63	31.50	30.75	35.39	38.30
4	27.48	35.36	37.46	29.52	36.53
极差	10.48	6.26	11.27	9.48	18.72
影响水平	3	5	2	4	1

影响越大,由表 2 可知 5 个因素对幅值影响从大到小顺序为层数 c_m >匝数 N_m >长度 l_m >线径 d_m >高度 h_m 。

各因素的水平值变化对导波幅值变化趋势存在一定影响,其分析可以为换能器结构优化提供重要参考,幅值随各水平值变化趋势如图 6 所示。

考虑边缘效应情况下,磁化器长度略大于曲折线圈宽度即可,不宜过大;随着磁化器高度的增加导波幅值略微增加,整体改变较小,随着磁化器线圈匝数的增加导波幅值逐渐增加,随着线圈直径和绕制层数的增加导波幅值先增大后减小。当曲折线圈有效长度为 8 mm,宽度为 21 mm 时,磁化器长度为 25 mm,磁化器高度为 30 mm,

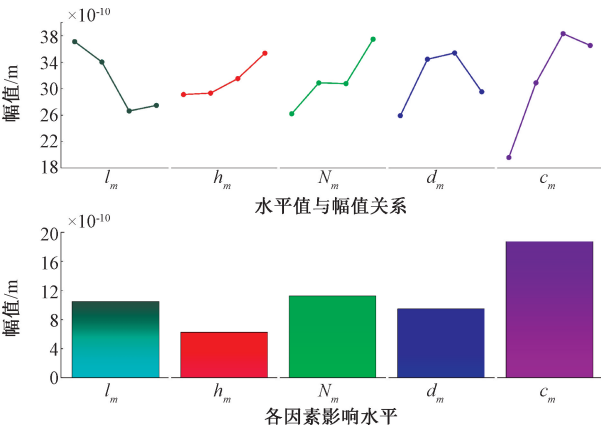


图 6 幅值变化趋势与影响水平

Fig. 6 Amplitude variation trend and influence level

磁化器线圈匝数为 100 匝、线圈直径为 1 mm,线圈层数为 3 是最佳参数。

3 实验与结果

3.1 系统搭建

根据有限元分析结果设计换能器,实验中曲折线圈有效长度 l_1 为 40 mm,宽度 w_2 为 30 mm,为了保证磁场均匀区域更好的覆盖曲折线圈,磁化器长度设置为 50 mm,高度为 30 mm,磁化器匝数选择 40 和 100,线径为 1 mm,考虑到交流电源额定功率、曲折线圈尺寸和柔性弯曲特性层数暂定为 1,搭建如图 7 所示双交流磁致伸缩 SH 导波系统,RITEC PRP-4000 为曲折线圈提供 5.5 A 的调制波电流 I_2 ,并接收基于逆磁致伸缩的超声信号,NF-BP4620 电源提供交流磁化电流 I_1 ,根据现有材料选择容易弯折的铁磁性 430 不锈钢作为实验对象。

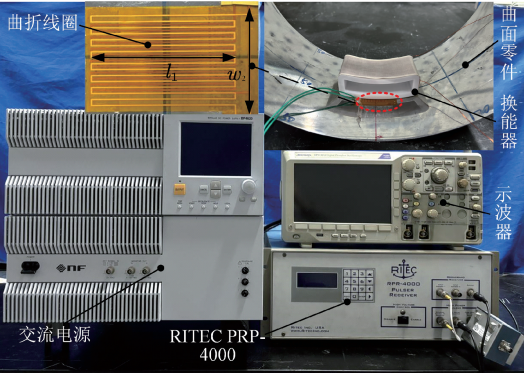


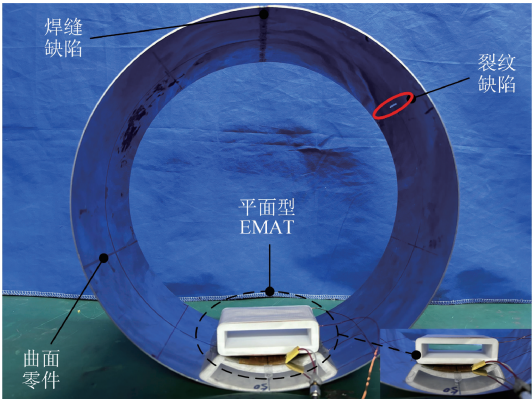
图 7 双交流磁致伸缩 SH 导波系统

Fig. 7 Dual AC magnetostrictive SH guided wave system

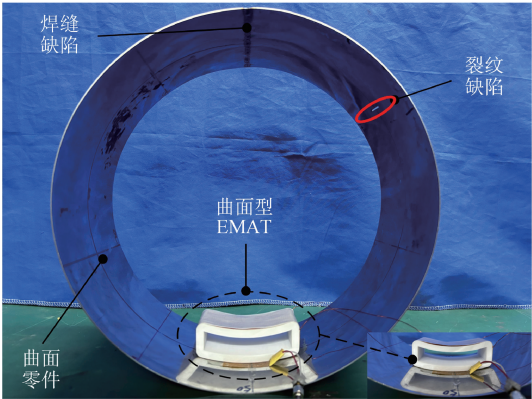
3.2 曲面检测实验

采用交流磁化自发自收型式检测曲面零件,如图 8 所示。选择半径为 159 mm 的圆筒模拟待检曲面对象,

图8(a)为平面型 EMAT 检测,如图8(b)所示,采用与待检曲面同曲率半径的电磁线圈进行曲面检测。支撑结构采用合适柔性材料时,可实现换能与变曲率检测对象的良好贴合。



(a) 平面型 EMAT 检测
(a) Planar EMAT detection



(b) 曲面型 EMAT 检测
(b) Curved surface EMAT detection

图8 自发自收曲面检测

Fig. 8 Self-excitation and self-reception detection of curved components

采用图7所示系统和图8中换能器检测1 mm厚曲面对象,在换能器两侧距离为35和40 mm处分别加工长宽深为20 mm×1 mm×1 mm和20 mm×1 mm×0.5 mm的裂纹缺陷,当磁化电流为12.3 A,磁化频率为5 kHz时,匝数为40时,检测结果如图9所示。以1 mm深缺陷回波为参考,平面型 EMAT 检测幅值为17.49 mV,而曲面型 EMAT 信号幅值达到20.75 mV 提高18.64%,此时焊缝反射回波较小不易识别。

当磁化器线圈匝数控制在40匝,磁化电流增加至30 A时,曲面型 EMAT 实验结果如图10所示,对比图9可知,信号幅值提高约35.71%达到28.16 mV,焊缝也可以被检测。

当磁化电流不变,磁化器线圈匝数为100时,曲面型 EMAT 实验结果如图11所示,信号幅值提高约85.59%,

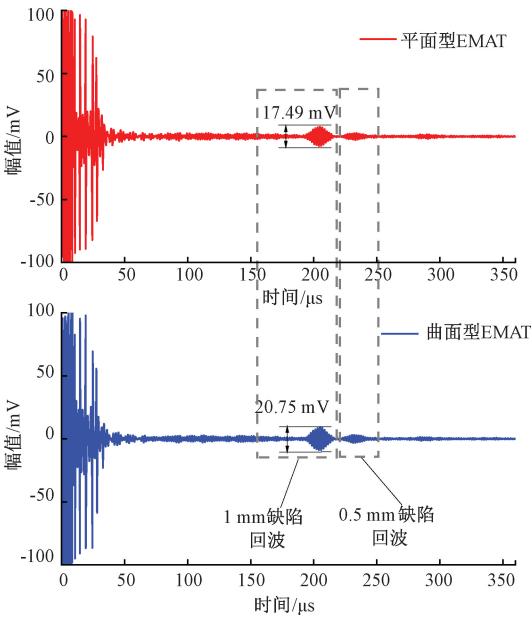


图9 12.3 A 磁化电流 40 匝线圈检测结果

Fig. 9 Detection results with a 12.3 A magnetization current and 40-turn coil

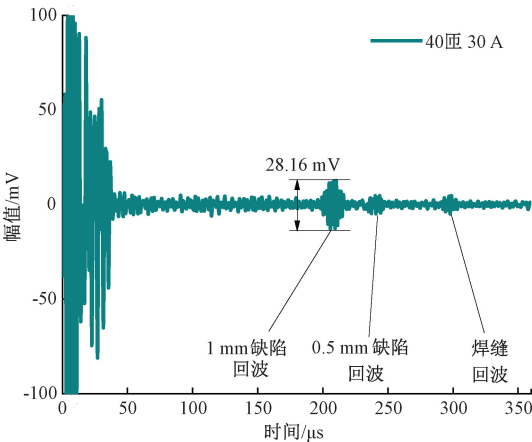


图10 30 A 磁化电流 40 匝线圈检测结果

Fig. 10 Detection results with a 30 A magnetization current and 40-turn coil

达到38.51 mV,焊缝回波清晰可见。实验结果与仿真分析结论一致,进而验证了仿真分析的正确性。

控制磁化器线圈匝数为40,磁化电流为30 A,选择曲率半径分别为70、115、159和194 mm的曲面检测对象,分别采用曲面型 EMAT 和平面型 EMAT 检测20 mm×1 mm×1 mm 裂纹缺陷,相同条件下重复5次实验,取平均值和标准误差棒绘制结果如图12所示。结果显示,随着曲率半径的增加两类换能器幅值均逐渐增加,相同曲率半径检测对象,曲面型 EMAT 幅值更大,且曲率半径较小时,曲面型 EMAT 优势更大,曲面型 EMAT 整体误差更小,波动更小,与仿真分析结论一致。

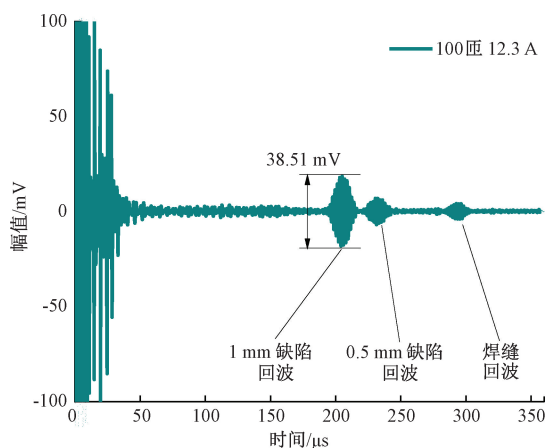


图 11 12.3 A 磁化电流 100 匝线圈检测结果

Fig. 11 Detection results with a 12.3 A magnetization current and 100-turn coil

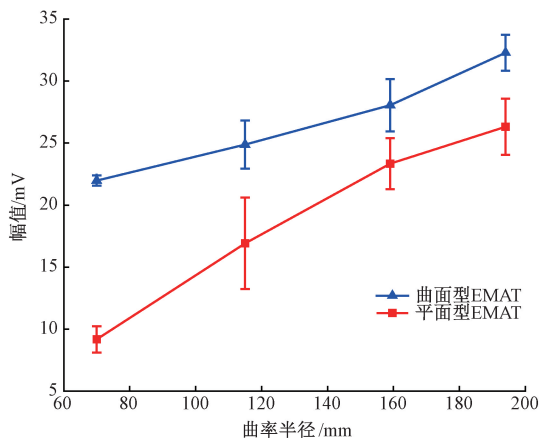


图 12 12.3 A 磁化电流 100 匝线圈检测结果

Fig. 12 Detection results with a 12.3 A magnetization current and 100-turn coil

上述实验结果验证了,双交流磁致伸缩换能器激励 SH 波的可行性和缺陷检测的有效性,面对曲面对象检测时,曲面型 EMAT 在幅值、误差和波动性等方面优于平面型 EMAT,磁化器线圈匝数和磁化电流的增加有助于提高信号幅值。

4 结 论

基于传统磁致伸缩 SH 导波理论,提出一种新的双交流磁致伸缩 SH 导波换能器,通过理论建模、有限元仿真和实验验证等方法,验证了换能器激励 SH 导波的可行性,缺陷检测的有效性,具体结论为:

1) 设计了一种适用于曲面型工件的双交流磁致伸缩

SH 导波换能器,采用交流磁化提供交变磁场,代替传统 EMAT 利用永磁或者大电流脉冲磁化等方式,可在导磁材料中有效形成 SH 导波。

2) 结合所建立的新型 EMAT 有限元仿真模型,分析了缺陷类型和曲率半径对所激励导波幅值或磁场强度的影响特性。结果表明,换能器能激励出纯净 SH0 导波,且与缺陷作用后未发生模态转化,不同缺陷反射波与透射波幅值存在数倍差异,为后续缺陷定量提供了依据。另外,随着检测对象曲率半径的增加,曲面型 EMAT 和平面型 EMAT 的磁场强度和导波幅值都逐渐增加,但曲面型 EMAT 磁场强度更大,且曲线标准差更小,波动更小,证明了所设计曲面型 EMAT 更适用于曲面对象。

3) 采用正交实验法对新型 EMAT 结构参数进行了优化,重点考察了 5 个影响因素,结果表明各因素对幅值影响程度为:层数>匝数>长度>线径>高度。

4) 搭建了双交流磁致伸缩 SH 导波实验系统,进一步验证换能器的曲面检测能力。发现在相同实验条件下,曲面型 EMAT 缺陷信号幅值比平面型 EMAT 提高了 18.64%。并且当曲面型 EMAT 的磁化电流和磁化线圈匝数分别增加至 30 A 和 100 匝时,幅值分别提高了 35.71% 和 85.59%,曲面型 EMAT 在幅值、误差和波动性等方面优于平面型 EMAT。

接下来,需要进一步深入研究不同材料中双交流磁致伸缩 SH 导波换能器的检测特性。此外,选择合适的支撑材料实现不规则曲面对象的柔性检测也是进一步研究的方向。

参考文献

- [1] HU S T, ZHAI G F, LI ZH CH, et al. The coupling of SH guided wave and Lamb wave in the three-dimensional waveguides with finite cross-section [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 222:111799.
- [2] 刘博涵,陈宗泽,于建新,等. 基于电磁超声换能器的 SH 型焊缝导波激励方法[J]. 仪器仪表学报,2024, 45(12):275-283.
- [3] LIU B H, CHEN Z Z, YU J X, et al. Investigation of exciting SH-type welded guided waves based on electromagnetic acoustic transducers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 275-283.
- [3] BIAN Z Q, WU B, GAO J, et al. Weak bond evaluation of lap bonding structures by SH guided waves using EMATs[J]. Nondestructive Testing & Evaluation, 2025,

- 40(4): 1313-1333.
- [4] 胡正, 屈海峰, 郭新峰, 等. 多面磁轭结构的单磁铁电磁超声换能器设计[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 174-182.
- HU ZH, QU H F, GUO X F, et al. Design of single-magnet based electromagnetic acoustic transducer with multi-sided yoke structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 174-182.
- [5] SWASCHNIG P, KOFLER J, KLAMBAUER R, et al. In-line detection of pouch foil damage in batteries during manufacturing using lamb waves [J]. NDT & E International, 2025, 152: 103322.
- [6] 申鑫, 涂君, 宋旖旎, 等. 用于焊缝缺陷检测的双弧 V 型 EMAT 设计与优化[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(7): 297-306.
- SHEN X, TU J, SONG Y N, et al. Design and optimization of double arc V-type EMAT for weld defect detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7): 297-306.
- [7] GUO Y H, LIU Z H, SU M Q, et al. Optimization of HBVD-EMAT based on orthogonal experimental and multilayer perceptron fusion method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 3608351.
- [8] 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(Suppl 1): 107781.
- [9] ZUO ZH Q, PEI N, ZHANG W M, et al. A novel Double-mode pulsed EMAT for High-temperature elastic constant measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-11.
- [10] 刘增华, 郑坤松, 朱艳萍, 等. 基于海尔贝克式排布的电磁铁 EMAT 研制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 286-296.
- LIU Z H, ZHENG K S, ZHU Y P, et al. Development of electromagnet EMAT based on Halbach arrangement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 286-296.
- [11] ZHENG Y, HE J W, ZHANG Z J, et al. Defect imaging of electromagnetic acoustic transducer dead-zone with oblique incidence and full skip SAFT method [J]. Ultrasonics, 2025, 155: 107728.
- [12] ZHAO L, WANG X, ZHAO B W, et al. Non-destructive testing method for crack based on diamond nitrogen-vacancy color center[J]. Instrumentation, 2022, 9(1): 56-64.
- [13] SUI X D, ZHANG R, LUO Y ZH, et al. A Lorentz force-based SH-typed electromagnetic acoustic transducer using flexible circumferential printed circuit [J]. Ultrasonics, 2024, 141: 107348.
- [14] LIU Z H, DENG L M, ZHANG Y CH, et al. Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT & E International, 2020, 109: 102193.
- [15] SHANKAR S, BALASUBRAMANIAM K. Beam forming of shear horizontal guided waves by multi-row staggered magnet configurations [J]. Ultrasonics, 2021, 114: 106405.
- [16] SUN H Y, WANG SH, HUANG S L, et al. Point-focusing shear-horizontal guided wave EMAT optimization method using orthogonal test theory [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(12): 6295-6304.
- [17] GAUTAM A K, YIN C C, BHATTACHARYA B. A new chevron electromagnetic acoustic transducer design for generating shear horizontal guided wave[J]. Ultrasonics, 2023, 135: 107137.
- [18] 刘增华, 钟树文, 李欣, 等. 基于全向性 SH0 模态磁致伸缩贴片型传感器阵列的铝板缺陷成像研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 8-15.
- LIU Z H, ZHONG X W, LI X, et al. Research on damage imaging based on omnidirectional SH0 mode magnetostrictive patch transducers array in aluminum plates [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 54(14): 8-15.
- [19] LIU Z H, ZHANG Y CH, XIE M W, et al. A direction-tunable shear horizontal mode array magnetostrictive patch transducer[J]. NDT & E International, 2018, 97: 20-31.
- [20] PUTHUSSERI R, BALASUBRAMANIAM K. Lowest remnant thickness estimation using Staircase Magnetostrictive Patch (ScaMP) Transducer [J]. NDT & E International, 2023, 136: 102811.
- [21] 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.
- YANG 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.
- [22] 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.
- LIU S ZH, WANG SH J, ZHANG CH, et al. Simulation analysis of electromagnetic acoustic surface wave of steel plate and quantitative defect detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 97-105.
- [23] PARRA-RAAD J, CEGLA F. On the steerability of phased array EMATs: The dipole element[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102563.
- [24] TKOCZ J, GREENSHIELDS D, DIXON S. High power phased EMAT arrays for nondestructive testing of as-cast steel[J]. NDT & E International, 2019, 102: 47-55.
- [25] 刘素贞,王文杰,张闯,等. 高能脉冲激励下的电磁超声响应特性[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4171-4178.
- LIU S ZH, WANG W J, ZHANG CH, et al. Electromagnetic ultrasonic transducer response characteristics excited by high energy pulses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4171-4178.
- [26] RIEGER K, ERNI D, RUETER D. Unidirectional emission and detection of Lamb waves based on a powerful and compact coils-only EMAT[J]. NDT & E International, 2021, 122: 102492.
- [27] RIEGER K, ERNI D, RUETER D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102569.
- [28] PEI C X, XIAO P, ZHAO S Q, et al. Development of a flexible film electromagnetic acoustic transducer for nondestructive testing [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2017, 258: 68-73.
- [29] ZHANG Y G, PEI C X, DENG J, et al. Development of a phased array flexible Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer for pipe inspection[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71(S1): S541-S549.
- [30] LIU T H, JIN Y, PEI C X, et al. A compact guided-wave EMAT with pulsed electromagnet for ferromagnetic tube inspection [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1-4): 951-958.
- [31] 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: 112991.
- [32] ZHANG Y G, PEI C X, DENG J, et al. A flexible EMAT enhanced with array magnetic core for inspection of curved structure [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 378: 115869.
- [33] LIANG B, TAO W G, HUO C L, et al. Performance analysis of high-temperature flexible dual-coil EMAT for ferromagnetic steel measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(22): 36560-36568.
- [34] DENG J, ZHANG Y G, QU Y Q, et al. Development of a flexible phased array electromagnetic acoustic testing system with array pickups[J]. NDT & E International, 2025, 149: 103263.
- [35] 黄松岭,王坤,赵伟. 电磁超声导波理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- HUANG S L, WANG SH, ZHAO W. Theory and application of electromagnetic ultrasonic guided waves[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [36] WANG J J, BI L, MA X D, et al. An efficient YOLOX-based method for photovoltaic cell defect detection[J]. Instrumentation, 2024, 11(2): 83-94.
- [37] TAN X G, ZHANG G M. Research on surface defect detection technology of wind turbine blade based on UAV image[J]. Instrumentation, 2022, 9(1): 41-48.
- [38] 时亚,石文泽,陈果,等. 钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 239-249.
- SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimized design of surface wave electromagnetic acoustic transducer for rail tread testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 239-249.

作者简介



周红军,2018 年于湖北汽车工业学院获得学士学位,2021 年于湖北工业大学获得硕士学位,现为湖北工业大学博士研究生,湖北汽车工业学院讲师,主要研究方向为电磁超声无损检测技术和深度学习。

E-mail:zhouhongjun@ hbut. edu. cn

Zhou Hongjun received his B.Sc. degree from Hubei University of Automotive Technology in 2018 and his M.Sc. degree from Hubei University of Technology in 2021. He is currently pursuing the Ph.D. degree at Hubei University of Technology and serves as a lecturer at Hubei University of Automotive Technology. His main research interests include electromagnetic acoustic nondestructive testing and deep learning.



涂君(通信作者),分别在 2006 年,2009 年和 2014 年于华中科技大学获得学士,硕士和博士学位,现为湖北工业大学教授,主要研究方向为超声无损检测新技术及应用。

E-mail:Juntu@ hbut. edu. cn

Tu Jun (Corresponding author) received his B.Sc. , M.Sc. and Ph.D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology in 2006, 2009 and 2014, respectively. He is currently a professor at Hubei University of Technology. His main research interest is new technology and application of ultrasonic nondestructive testing.



宋旖旎,2020 年于武汉理工大学、英国伯明翰大学获得学士学位,2022 年于英国华威大学获得硕士学位,现为华中科技大学博士研究生。主要研究方向为电磁超声。

E-mail:songyini@ hust. edu. cn

Song Yini received her B.Sc. degree from Wuhan University of Technology and the University of Birmingham in 2020, her M.Sc. degree from the University of Warwick in 2022. She is currently a Ph.D. candidate at Huazhong University of Science and Technology. Her main research interest is electromagnetic acoustic transducers.



宋小春,分别在 1994 年和 1998 年于湖北工业大学获得学士和硕士学位,2005 年于华中科技大学获得博士学位。现为湖北工业大学教授,主要研究方向为超声无损检测新技术及应用。

E-mail:songxc@ mail. hbut. edu. cn

Song Xiaochun received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Hubei University of Technology in 1994 and 1998, respectively, and his Ph.D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2005. He is currently a professor at Hubei University of Technology. His main research interest is new technology and application of ultrasonic nondestructive testing.