

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107421

基于宽频激励电磁声谐振 7075 铝合金板厚检出概率^{*}

蔡智超, 李毅博

(华东交通大学电气与自动化工程学院 南昌 330013)

摘 要:电磁超声换能器 (EMAT) 换能效率低、激发信号弱, 而基于长周期激励信号以产生声波共振的电磁声谐振技术 (EMAR) 虽然可以提高接收信号的信噪比, 然而可能导致主脉冲加宽并扩大超声波检测盲区, 降低测量精度。本文应用一种宽频激励电磁声谐振技术 (BE-EMAR) 和一种 Halbach 阵列纵波 EMAT, 以单周期宽频激励作为 EMAT 输入信号, 并利用 EMAR 方法对 7075 型铝合金试件板厚进行测量, 借助检出概率 (POD) 模型来表征该技术针对微金属板厚的测量精度。实验结果表明, 在未降噪时 BE-EMAR 得到的三种信噪比下的 POD 曲线中, 对应的 a_{50} 或 $a_{90/95}$ 最大差异值为 0.05 mm, 同一信噪比下降噪前后的最大差异值为 0.07 mm, 而在时差法 (ToF) 得到的 POD 曲线中这一最大差异值则为 0.21 mm, 因此说明 BE-EMAR 降噪前后得到的结果并无较大差别, 该方案对于常规噪声信号不敏感; 且降噪前后, 在 BE-EMAR 得到的 POD 曲线中, a_{50} 和 $a_{90/95}$ 均可稳定在 0.55 mm 以内, 证明了 BE-EMAR 比 ToF 测厚具有更优的精度、稳定性和抗噪能力。

关键词: 宽频激励; 电磁声谐振; Halbach 阵列; 纵波; 检出概率

中图分类号: TH878 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Probability of detection of 7075 aluminum alloy plate thickness based on BE-EMAR

Cai Zhichao, Li Yibo

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The electromagnetic acoustic transducer (EMAT) has low energy conversion efficiency and weak excitation signal, although the electromagnetic acoustic resonance (EMAR) technology based on long-period excitation signal for generating acoustic resonance can improve the signal-to-noise ratio of the received signal, it may cause the main pulse widen, enlarge the blind area of ultrasonic detection and reduce the measurement accuracy. In this paper, a broadband excitation electromagnetic acoustic resonance technology (BE-EMAR) and a Halbach array longitudinal wave EMAT are applied, a single-cycle broadband excitation is used as the EMAT input signal, and the EMAR method is used to measure the plate thickness of 7075 aluminum alloy specimens. The probability of detection (POD) model is used to characterize the measurement accuracy for micro metal plate thickness. The experiment results show that in the POD curves obtained with BE-EMAR under three signal-to-noise ratios when the noise is not reduced, the corresponding maximum difference of a_{50} or $a_{90/95}$ is 0.05 mm, while the maximum difference under the same signal-to-noise ratio before and after the noise reduction is 0.07 mm. However, in the POD curve obtained with the time of flight (ToF) method the maximum difference is 0.21 mm. Therefore, there is no significant difference between the results obtained with BE-EMAR before and after noise reduction, and the scheme is insensitive to conventional noise signals. Before and after noise reduction, in the POD curve obtained with BE-EMAR, a_{50} and $a_{90/95}$ both can be stabilized within 0.55 mm, which proves that the BE-EMAR has better accuracy, stability and anti-noise ability than ToF method in thickness measurement.

Keywords: broadband excitation; electromagnetic acoustic resonance; Halbach array; longitudinal wave; probability of detection

收稿日期: 2021-01-22 Received Date: 2021-01-22

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (51807065)、江西省研究生创新专项 (YC2020-S304) 资助

0 引言

随着我国载人航天和国防军事等领域的蓬勃发展,金属板材需求量与日俱增,对其加工精度和故障诊断提出了更高的要求^[1]。金属板材在服役过程中,由于摩擦、腐蚀等恶劣工况的影响导致板厚减薄,严重时可能形成贯穿型孔洞,威胁设备及人员的安全。因此,对金属板厚进行实时、快速、准确地测量对于工件健康运行具有重要意义^[2]。

电磁超声无损检测技术,使用电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)直接在试件表面激发超声波,因此无需使用耦合剂,且不需要对待测试件表面进行预处理,能够在高温、高压等恶劣工况下正常检测^[3-5],相较于传统的压电超声检测,可操作性高,检测周期短,因此被广泛应用于金属厚度检测、缺陷甄别等方面^[6-7]。然而该技术易受到换能效率低、噪声干扰等不利因素的影响。将 EMAT 与共振技术相结合形成的电磁声谐振技术(electromagnetic acoustic resonance, EMAR),以长周期信号作为激励,使得声波在试件内部产生共振,能够有效降低噪声信号对检测结果的干扰,提高信噪比(signal to noise ratio, SNR),同时通过扫频产生的声波谐振特征能够实现金属板厚、管壁减薄等方面的精确测量^[8-10]。为了定量描述检测手段的精度水平以及对特定尺寸缺陷或金属板厚的检测情况做出预测,引入检出概率(probability of detection, POD)概念来评估某一缺陷或者厚度下的检测成功率,并利用 POD 曲线描述不同尺寸对应的检测概率^[11-13]。国内外学者针对 EMAR 和 POD 模型进行了大量的理论与试验研究。Yusa 等^[14]通过 EMAR 方法对酸蚀处理后的金属粗糙面试件进行厚度测量,提出一种新型数据拟合方案和 POD 模型,通过设定不同阈值证明了该模型对于微小厚度的表征能力;Li 等^[15]采用 EMAR 方法对两组高温载荷处理后的试件进行分析,研究了三次谐波对于评估铁磁性和非铁磁性材料高温损伤的意义;沙正骁等^[16]对发动机中的粉末涡轮盘夹杂缺陷进行了检出概率研究,结果显示在 95% 置信水平下,以 90% 概率检出的缺陷尺寸为 0.167 mm,证明该检测工艺的可靠性满足发动机设计要求。然而,EMAR 检测为了满足超声波在时域上发生叠加以产生共振,需要激发长周期信号,这将导致主脉冲加宽进而扩大超声波的检测盲区,致使真正可检测的谐波信号出现在第二次甚至多次反射叠加之后,且声衰减效应明显。另外,传统超声波测厚技术通常利用声波在试件内部的飞行时间(time of flight, ToF)进行计算,但回波信号峰值点的选取往往易受到噪声信号的影响,从而降低测量精度。

针对以上问题,本文提出一种宽频激励电磁声谐振

技术(broadband excitation-EMAR, BE-EMAR),该方案使用单周期宽频激励作为换能器线圈输入信号,同时利用 EMAR 手段对 7075 型铝合金试件板厚进行测量,并通过 POD 曲线表征该方案对金属板厚的测量精度。由于非铁磁材料中的换能过程一致,且材料厚度不影响宽频激励的激发与接收,因此该方案对其他厚度的铝合金板和非铁磁材料同样适用。第 1 节介绍 Halbach 阵列电磁超声纵波换能器工作原理和宽频激励信号模型;第 2 节运用有限元仿真,分析了宽频激励下超声纵波的质点位移特点以及声波传播过程;第 3 节与第 4 节通过实验平台对不同厚度试件进行测量,将得到的数据进行线性拟合并绘制 POD 曲线;最后,利用降噪处理验证了 BE-EMAR 的抗噪性以及相较于 ToF 测厚的优势。

1 检测原理

1.1 EMAT 工作原理

EMAT 主要包括 3 部分:永磁体、线圈和被测试件。传统的纵波 EMAT 为了得到水平方向磁场,通常将线圈布置于磁极相反的相邻永磁体之间或单个横置永磁体的正下方,然而以上两种永磁体排布均难以产生较强的水平磁场,导致换能器激发信号偏弱,影响检测准确度。Halbach 永磁阵列能够有效克服上述问题,其最早由美国 Klaus Halbach 教授提出,目前广泛应用于对磁场提出较高要求的各类电机中,如高速电机、高精度伺服电机、直线电机等^[17]。它通过将不同磁化方向的永磁体按照一定顺序排列,使得阵列其中一侧磁场显著增强而另一侧大幅减弱,可以在不增大换能器尺寸的条件下有效提高水平磁场,加剧试件集肤层质点振动,从而提高回波信号幅值。图 1 为 Halbach 永磁阵列换能器激发纵波原理。

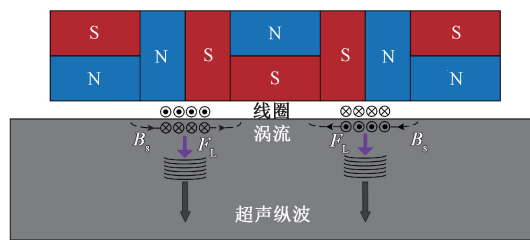


图1 Halbach 阵列纵波激发原理

Fig. 1 The principle of longitudinal wave excitation of Halbach array

当宽频脉冲电流 J_0 输入至换能器线圈时,感应出动态磁场强度 H_d 和交变磁通密度 B_d ,从而在线圈附近空间激发出电场 E_m 和感生电动势 ε_m 。根据 Faraday 电磁感应定律,在试件集肤层将感应出与激励电流方向相反

的涡流 $\mathbf{J}_e$ 。涡流在永磁体提供的水平偏置磁场作用下受到垂直方向的洛伦兹力,试件集肤层质点高频振动从而激发出超声纵波,并垂直于试件表面进行传播。当超声波触底反射又传播至换能器下方时,切割静磁场 $\mathbf{B}_s$ 磁感应线,从而产生动生电动势 ε_v 。

在检测金属材料时,磁场强度和电场强度满足如下关系式:

$$\nabla \times \mathbf{H}_d = \mathbf{J}_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_d = \mu_r \mathbf{H}_d \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_m = -\frac{\partial \mathbf{B}_d}{\partial t} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E}_m \quad (4)$$

式中: μ_r 为材料相对磁导率; σ 为材料电导率。

本文中所用试件为非铁磁性材料 7075 型铝合金,而在非铁磁性材料中,集肤层质点的振动主要是由洛伦兹力 $\mathbf{F}_L$ 作用产生,因此质点位移可以表示为:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{F}_L = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中: ρ 为材料密度; $\mathbf{u}$ 为位移矢量; μ 和 λ 为拉梅常数。

试件集肤层质点所受到的洛伦兹力 $\mathbf{F}_L$ 由交变磁场和静磁场共同作用产生,表示为:

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J}_e \times (\mathbf{B}_s + \mathbf{B}_d) \quad (6)$$

换能器探头接收到的电压信号 $\varepsilon_{\text{total}}$ 是感生电动势与动生电动势的叠加:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_m + \varepsilon_v \quad (7)$$

根据 Faraday 电磁感应定律,感生电动势 ε_m 可由如下公式计算:

$$\varepsilon_m = \oint_l \mathbf{E}_m \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (8)$$

$$\varepsilon_m = -\frac{d}{dt} \iint_s \mathbf{B}_d \cdot d\mathbf{S} \quad (9)$$

式中: Φ_m 为感应磁通。

1.2 激励信号模型

EMAT 线圈中通入宽频电流激励,其表达式为:

$$u_0(t) = A \exp[-(t - t_0)^2 / \tau^2], 0 \leq t < 2t_0 \quad (10)$$

式中: A 为电流幅值; t_0 为时间系数; τ 为宽带系数。

试件集肤层质点高频振动产生超声波并垂直试件上表面向下传播,超声波触碰试件底部将发生声反射。考虑到超声波在试件内部传播过程中和反射时均会存在声衰减,因此第一次回波接收线圈感应到的电压表达式为:

$$u_1(t) = A e^{-\delta_0 t - \delta(\Delta t)} \exp[-(t - \Delta t - t_0)^2 / \tau^2], \Delta t \leq t < 2t_0 + \Delta t \quad (11)$$

式中: δ_0 为衰减系数; δ 为声反射系数; Δt 为相邻两次回波时间间隔。

同理,第 n 次回波的电压表达式为:

$$u_n(t) = A e^{-\delta_0 t - n\delta(\Delta t)} \exp[-(t - n\Delta t - t_0)^2 / \tau^2], n\Delta t \leq t < 2t_0 + n\Delta t \quad (12)$$

因此,在整体时域上,接收线圈感应到的电压信号可以表示为前 n 次回波信号的叠加:

$$s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \quad (13)$$

图 2 为接收到的时域信号组成示意图。

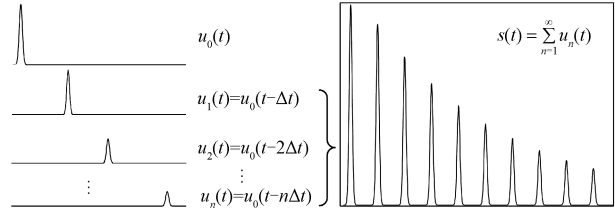


图 2 时域信号组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of time domain signal composition

1.3 板厚计算方法

电磁声谐振技术 (electromagnetic acoustic resonance, EMAR) 是以非接触声波谐振技术为基础的新型无损检测方法,通过扫频产生的谐振特性能够实现对板厚、管壁减薄等方面的精确测量。当被测试件厚度为超声波波长的整数倍时,入射波和反射波会在试件内部发生谐振。由于本文所用宽频激励带宽大,波长含量丰富,则声波中必定存在某个波长满足谐振条件,因此在该激励下会存在多个谐振频率,其中第 m 个谐振频率 f_m 及谐振间隔 Δf 可表示为:

$$f_m = m \frac{v}{2d} \quad (14)$$

$$\Delta f = f_m - f_{m-1} = \frac{v}{2d} \quad (15)$$

式中: v 为超声波声速; d 为试件厚度。

当换能器采用收发一体工作模式时,在接收到的回波信号时域图中,相邻两个回波之间的时间间隔 Δt 即是超声波在试件中沿试件厚度方向传播单个来回的时间,即飞行时间 ToF,故 d 也可用如下公式计算:

$$d = \frac{v\Delta t}{2} \quad (16)$$

2 有限元建模及仿真分析

搭建 BE-EMAR 有限元模型,对其工作过程进行多物理场有限元仿真分析,其中包括交变磁场、无电流磁场以及结构场等多物理场耦合,试件中的交变电流及静磁场分别由交变磁场、无电流磁场进行求解,结构场主要是用来分析求解试件中超声波的激励及传播。通过瞬态求解能够分析电磁力作用下的质点振动以及动态声波在试

件内部的位移情况。

换能器采用收发一体结构布置,永磁体为方形钕铁硼磁铁,充磁方向按照 Halbach 阵列设计。试件采用 7075 型铝合金材质,换能器线圈匝数为 4,其他参数如表 1 所示。

表 1 仿真中各项参数
Table 1 Various parameters in simulation

参数	永磁体	试件	线圈
剩余磁场强度/T	1.2	-	-
矫顽力/(kA·m ⁻¹)	900	-	-
尺寸/mm	5×5	40×3.2	-
杨氏模量/Pa	-	7.1×10 ¹⁰	-
泊松比	-	0.25	-
电导率/(S·m ⁻¹)	-	3.775×10 ⁷	-
密度/(kg·m ⁻³)	-	2 810	-
导线宽 w/mm	-	-	0.2
导线高 l/mm	-	-	0.05
线间距 d/mm	-	-	0.2
提离距离/mm	0.5	-	-
加载电流/A	-	-	20

由于涡流的产生具有集肤效应,因此在试件中感生出的涡流仅存在于与换能器相近一侧表面的集肤深度内。仿真中为了确保模型计算的准确性,需要对试件的集肤层进行网格细化,最大单元大小设置为 0.05 mm。试件域的最大单元,按照在宽频激励下产生的纵波中,最小波长的 1/5,即 0.11 mm 进行网格划分。其他区域均采用自由三角形进行网格剖分。图 3 为仿真模型及其细化区域局部放大图。

图 4 为 Halbach 阵列永磁体平面磁场分布示意图,箭头表示磁场方向。可以看到, Halbach 阵列型永磁体排布能够显著增强单侧磁场,在中间永磁体左右两侧正下方两区域磁通密度水平分量最大,垂直分量最小,为得到垂直方向的洛伦兹力以产生超声纵波,并且尽可能地去

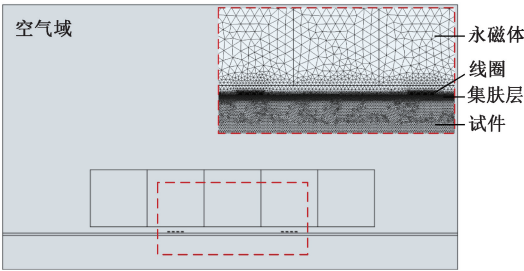


图 3 模型网格细化

Fig. 3 Grid refinement of the model

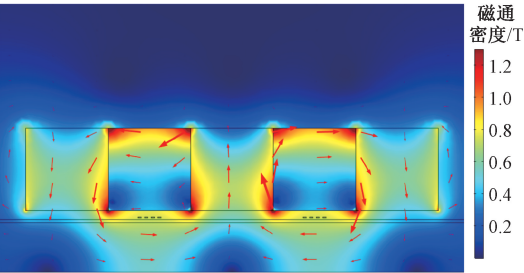


图 4 Halbach 阵列永磁体磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution of Halbach array permanent magnet

除横波成分,仿真中将线圈布置于此。

与传统电磁超声换能器线圈采用单一频率正弦电流作为激励不同,本文输入信号为包含频率成分较多的宽频激励。宽频激励激发超声纵波、正弦激励激发超声纵波和正弦激励激发超声横波三者各自的声波沿试件厚度方向传播位移分别如图 5~7 所示。可以看到,图 6 与 7 中激发的声波呈现规整的片状,且同一侧线圈所引起的质点位移方向交错排布,这是由于在单一频率激励下,线圈中电流方向和质点所受洛伦兹力的方向交替变化,因此试件中质点的振动具有规律性。而图 5 则显示,宽频激励下的声波传播位移呈“水滴”状,且云图中颜色含量丰富,表明声波内部包含的质点位移量成分较多,质点振动不具有周期性。

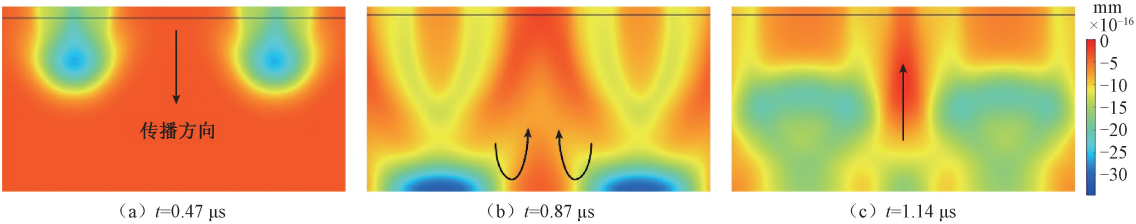


图 5 宽频纵波传播

Fig. 5 The propagation of broadband longitudinal wave

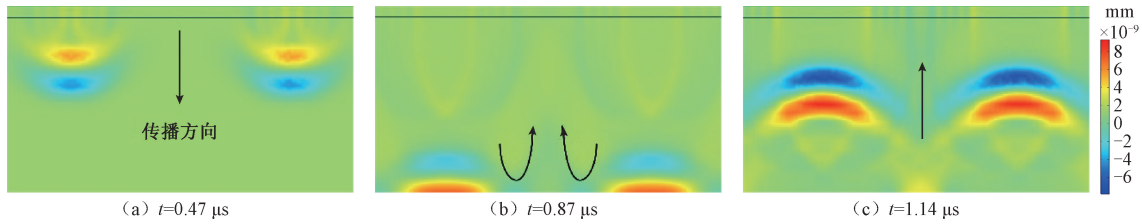


图6 正弦纵波传播

Fig. 6 The propagation of sinusoidal longitudinal wave

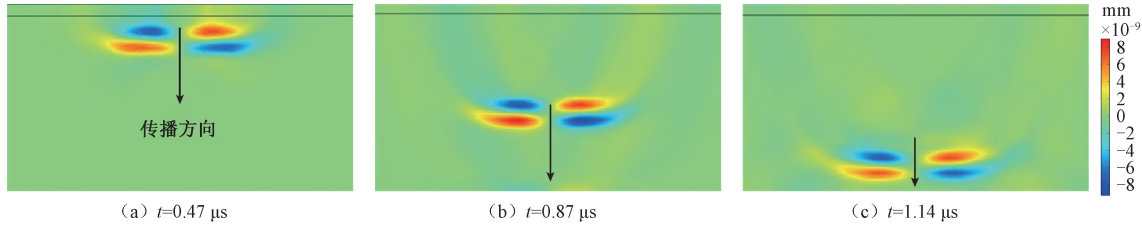


图7 正弦横波传播

Fig. 7 The propagation of sinusoidal transverse wave

对比图 6(a) 与图 7(a) 能够得到, 在相同时间内纵波传播位移约为横波的两倍, 即纵波的波速两倍于横波。因此在相同频率下, 纵波波长同样为横波的两倍, 根据声波传播特点可知, 声波的波长影响声波在传播介质中的衰减。波长较长的纵波在试件中传播时声波衰减减小、穿透能力强、传播距离长, 因此适用于对试件进行厚度检测^[18]。宽频激励所产生的声波信号中, 由于所包含频率带宽大, 因此不需要进行扫频即可使声波在试件内部产生谐振, 从而实现谐振频率以及频率间隔的快速提取。

超声波垂直于试件表面向下传播, 随着声程的增加, 声波的能量将会发生一定的衰减, 当声波遇到试件底部将发生反射, 按照原路径又传播至试件顶部, 如此往复直至声波能量衰减至 0。

3 实验装置

采用宽频激励装置作为超声波激励源, 产生单周期宽频信号, 经过功率放大之后加载至电磁超声换能器, 继而在试件集肤层感应出涡流, 集肤层质点在洛伦兹力的作用下高频振动, 从而在试件表面产生超声波。当换能器接收到回波信号之后, 通过双工器传输至前置放大器对信号进行放大、滤波, 最后通过示波器对检测结果进行观测。图 8 为检测系统原理。

实验中使用长宽均为 100 mm、厚度从 0.5 ~ 10 mm 不等的 7075 型铝合金板作为被测试件。本研究中所使用的电磁超声换能器, 采用 25 个棱长为 5 mm 的正方体 N35 型钕铁硼永磁体, 按照 Halbach 阵列进行排布。线圈

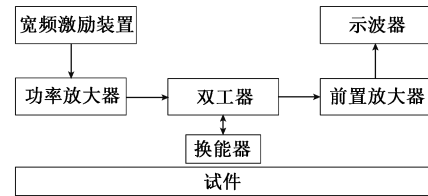


图8 检测系统原理

Fig. 8 Principle of the detection system

按照“回”形绕制, 匝数为 10, 导线宽 0.3 mm, 高度 0.05 mm, 线间距 0.1 mm, 置于永磁体水平磁场最强处, 以激发出纵波。图 9 为 Halbach 阵列电磁超声换能器三维结构。

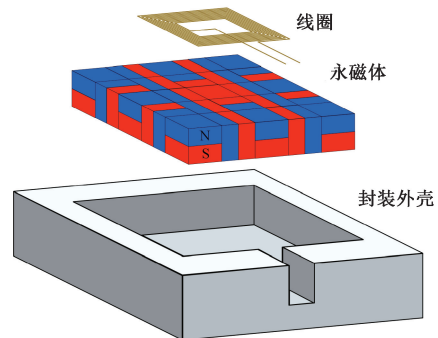


图9 换能器结构

Fig. 9 Transducer structure

考虑到线圈和永磁体之间的粘合需要, 以及其他材料因素的影响, 实验中永磁体距离试件上表面之间的提离距离约为 1 mm, 换能器实物如图 10 所示。

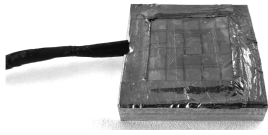


图10 换能器实物图

Fig. 10 Picture of the transducer

4 信号处理及数据分析

4.1 信号处理

由于 EMAT 在工作时与被测试件不发生接触,因此永磁体和试件上表面之间的提离距离将会影响感应涡流附近的静态偏置磁场强度,进而影响回波信号。当提离距离增大时,接收信号的信噪比将随之降低。为了分析在不同信噪比下本文所使用的 BE-EMAR 法对金属板厚测量的准确性和稳定性,试验时改变换能器与试件之间的提离距离,从而获得不同信噪比的回波信号。经过实测,提离距离为 0 时接收到的信号信噪比约为 18 dB,提离距离约 0.4 mm 时信噪比降低为约 12 dB,提离距离约 0.8 mm 时信噪比降低为约 6 dB。

将信噪比为 6 dB 的含噪宽频激励信号进行降噪处理,并对降噪前后时域图进行频谱分析,得到频谱图如图 11 所示。通过对比可以看出,宽频激励下的接收信号频谱对于试验环境中的噪声信号不敏感,在不降噪情况下依然可以准确识别频率峰值和相邻峰值之间的频率间隔 Δf ,这表明在不同的提离距离下,BE-EMAR 法对于常规噪声信号有较强的抗干扰能力。

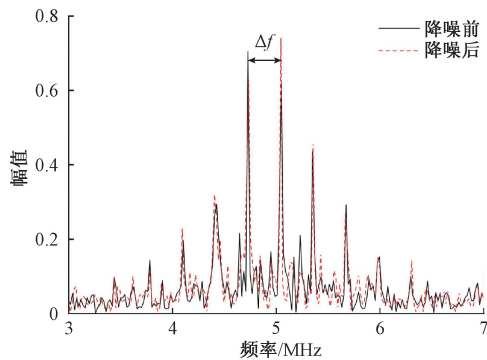


图11 降噪前后频谱图

Fig. 11 Spectrum diagram before and after noise reduction

表 2 为 BE-EMAR 法与传统的 EMAR 法在 3 种信噪比下(18、12、6 dB)的测量误差对比。其中 max. error (%) 表示最大测量误差,mean. error (%) 表示测量误差平均值。从表 2 中可以看出,BE-EMAR 和 EMAR 两种方法在高信噪比下的测量误差基本一致,而当信噪比降低至 6 dB

时,EMAR 法的最大测量误差率陡升至 72%,而测量误差平均值升至 10.9%,分别比 BE-EMAR 法高出 50% 和 5.2%,说明两种方法在高信噪比条件下测厚准确度大致相同,而 BE-EMAR 法在低信噪比条件下相对于 EMAR 的测厚优势更明显。此外,EMAR 需要使用长周期激励使回波信号在时域上产生叠加,并框选某一段回波信号进行扫频操作,而 BE-EMAR 则不需要上述步骤,降低了实验程序的复杂性。

表 2 BE-EMAR 与 EMAR 误差对比

Table 2 Error comparison between BE-EMAR and EMAR

	BE-EMAR			EMAR		
	18	12	6	18	12	6
max. error/%	8.3	12.0	22.0	8.0	7.5	72.0
mean. error/%	4.2	4.1	5.7	3.8	4.0	10.9

4.2 回归模型选择

分别使用 BE-EMAR 方法和 ToF 法,对 7075 型铝合金试件厚度进行测量。记真实厚度值为 a ,而检测厚度值为 $\hat{a}$,mm。采用 $\hat{a}$ vs a 的数据处理方式统计接收到的超声回波信号。

根据线性回归理论,最小二乘法拟合之后的随机变量 y 和自变量 x 满足如下关系:

$$y = \beta_0 + x\beta_1 + \varepsilon \quad (17)$$

式中: β_0 为拟合直线 y 轴截距; β_1 为斜率; ε 为残差,满足 $N(0, \sigma^2)$ 的正态分布。

分别将 y 取 $\hat{a}$, x 取 a 代入式(17)中得:

$$\hat{a} = \beta_0 + a\beta_1 + \varepsilon \quad (18)$$

已知 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, 则 $\hat{a} \sim N(\beta_0 + a\beta_1, \sigma^2)$ 。那么 $\hat{a}$ 的概率密度函数满足:

$$f(\hat{a}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(\hat{a} - \beta_0 - \beta_1 a)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (19)$$

构造似然函数:

$$L = \prod_{i=1}^n f(\hat{a}_i; \beta_0, \beta_1, \sigma) \quad (20)$$

式中: n 为实验总次数。其对数形式为:

$$\ln(L) = -n\ln(\sigma) - \frac{n}{2}\ln(2\pi) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{a}_i - \beta_0 - \beta_1 a}{\sigma} \right)^2 \quad (21)$$

其中,各参数值可按式计算:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_0} = 0 \\ \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta_1} = 0 \\ \frac{\partial \ln(L)}{\partial \sigma} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

使用得到的参数值绘制不同信噪比下的测量结果拟合情况如图 12 所示。图中实线表示拟合直线,两侧虚线表示 95% 置信区间范围。

从图 12 中可以看到,随着信噪比逐渐降低,直线拟合的误差范围稍有增大,但总体上 BE-EMAR 法对于微小厚度的测量值能够集中在比较小的范围内,测量结果具有良好的聚拢性。当被测试件厚度大于 2 mm 时,时域图中回波峰值和相邻回波间隔 Δt 能够清晰识别,频谱图中频率间隔 Δf 同样能够准确提取,此时利用 ToF 进行厚度测量与 BE-EMAR 法准确度接近,二者误差均处于较小范围内。而当被测试件厚度小于 2 mm 时,由于时

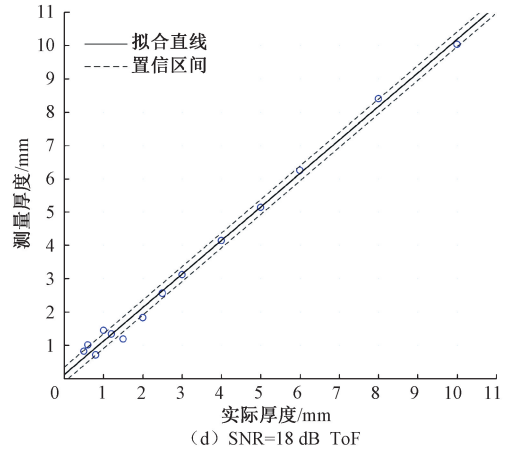


图 12 不同信噪比下的拟合直线

Fig. 12 Fitting line under different SNRs

域图中回波信号发生叠加,难以对时间间隔 Δt 进行准确提取,ToF 的测量精度降低。而此时频谱图中频率间隔 Δf 依然能够较为清晰识别,因此利用 ToF 对 2 mm 以下的板厚进行测量,测量精度逊于 BE-EMAR 法。

4.3 POD 曲线绘制

本文中,检出概率 $POD(a)$ 定义为在特定条件下,厚度为 a 的试件被准确测量的概率。若函数 $f_a(\hat{a})$ 表示在特定厚度 a 下响应 $\hat{a}$ 的概率密度,那么:

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{dec}}^{\infty} f_a(\hat{a}) d\hat{a} \quad (23)$$

式中: $\hat{a}_{dec}$ 表示判定阈值,表示仅当某一对象的检测厚度 $\hat{a}$ 超过此判定阈值时,才被认为是一次成功的检测,否则将其视为噪声信号。 $\hat{a}_{dec}$ 的设置与实验条件、人员熟练程度等因素有关。根据对无检测对象时得到的环境噪声信号进行分析,确定该实验条件下检测厚度阈值为 0.3 mm。

根据定义,POD 是一个累计分布函数:

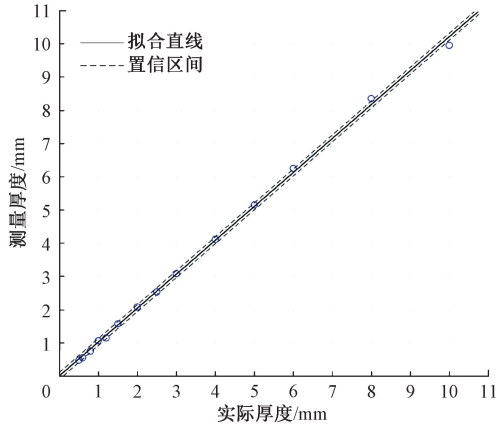
$$POD = \Phi(t) \quad (24)$$

其中,

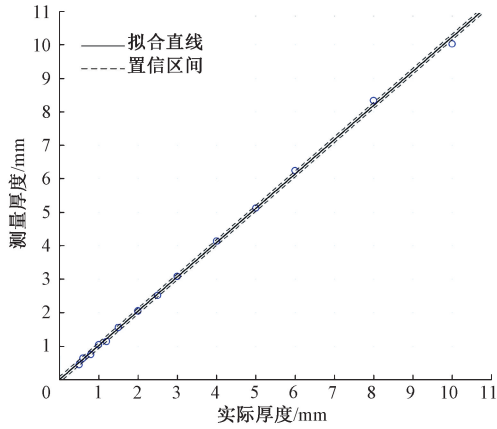
$$t = \frac{\beta_0 a + \beta_1 - \hat{a}_{dec}}{\sigma} \quad (25)$$

根据 4.2 节得到的各项参数估计值,绘出降噪之前各信噪比下的 POD 曲线如图 13 所示。图中实线即为检出概率曲线,两侧虚线为 95% 置信区间,表示对某一厚度试件进行测量时,成功测得的概率有 95% 的可能性处于上下两条虚线以内。

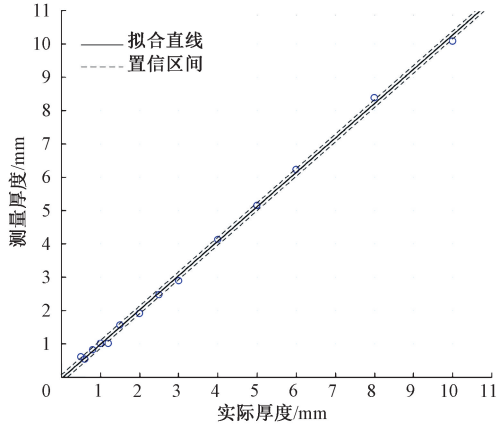
为了分析 BE-EMAR 和 ToF 两种测量手段对噪声信号的敏感程度,对不同信噪比下得到的时域信号进行降噪处理,分析时域信号降噪前后对测量准确性的影响。之后同样采用上述公式进行有关参数求解,绘得各信噪比降噪之后的 POD 曲线如图 14 所示。



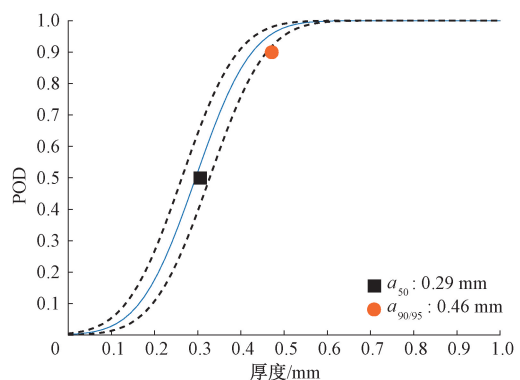
(a) SNR=18 dB BE-EMAR



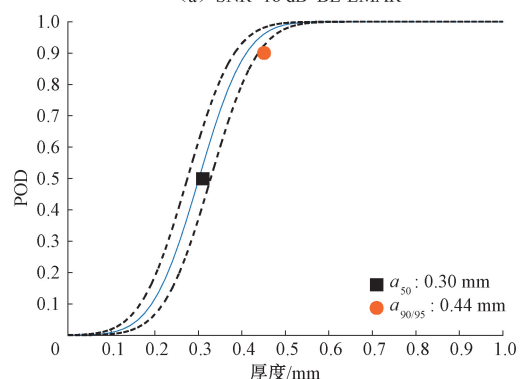
(b) SNR=12 dB BE-EMAR



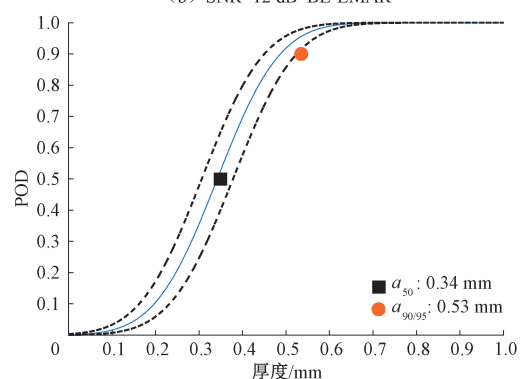
(c) SNR=6 dB BE-EMAR



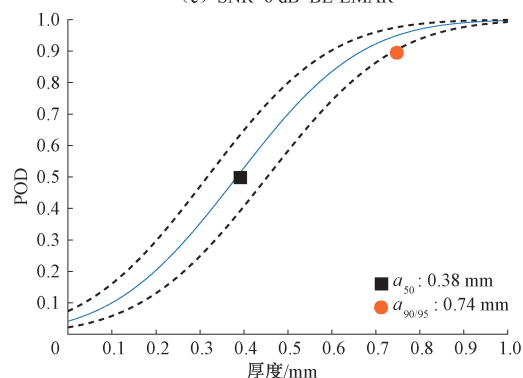
(a) SNR=18 dB BE-EMAR



(b) SNR=12 dB BE-EMAR



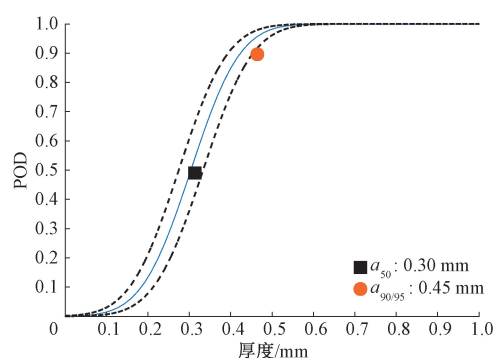
(c) SNR=6 dB BE-EMAR



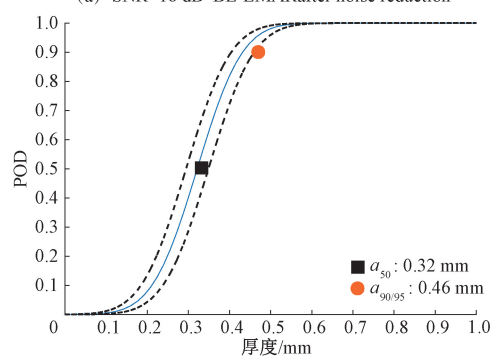
(d) SNR=18 dB ToF

图13 不同信噪比下的POD曲线

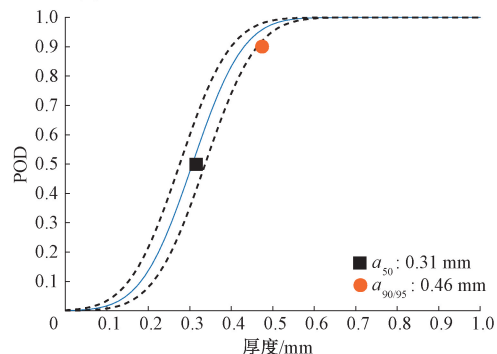
Fig. 13 POD curves under different SNRs



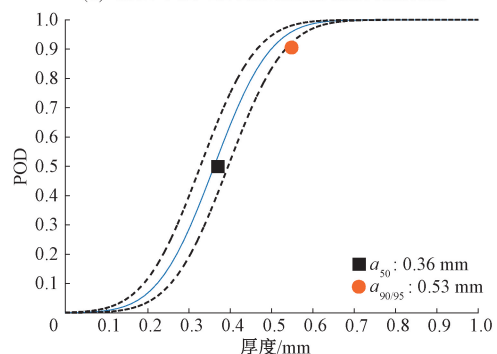
(a) SNR=18 dB BE-EMAR after noise reduction



(b) SNR=12 dB BE-EMAR after noise reduction



(c) SNR=6 dB BE-EMAR after noise reduction



(d) SNR=18 dB ToF after noise reduction

图14 降噪后的POD曲线

Fig. 14 POD curves after noise reduction

POD 曲线描述了试件厚度值与检测概率之间的对

应关系,从图中可以看出,随着厚度值的增大,成功测量

的概率也随之提升,这与实际检测情况相吻合。POD 曲线中, a_{50} 和 $a_{90/95}$ 是衡量检测水平的重要指标, a_{50} 定义为在准确率为 50% 的条件下,所能够检测到的试件厚度值,因此 a_{50} 数值越小,说明使用的检测手段对于微小厚度的检测越精确。与 a_{50} 类似, $a_{90/95}$ 表示在 95% 的置信水平下,以 90% 概率可以测量到的最大厚度值。

从图 13 可以看出,当接收到的回波信号信噪比由 18 dB 降低至 12 dB 时,BE-EMAR 法得到的 POD 曲线中对应的 a_{50} 和 $a_{90/95}$ 数值差异在 4.5% 以内。在信噪比降低为 6 dB 时,上述指标差异值增大至 15%,但数值总体上仍处于较低水平。说明信噪比的降低并未引起 POD 曲线的明显变化,表明该方案具有良好的抗噪效果。

对比图 13、14 可以得出,降噪之后的 BE-EMAR 方法整体上的 a_{50} 和 $a_{90/95}$ 值相比于降噪前略有减小。而 ToF 降噪之后的 $a_{90/95}$ 值大幅降低,证明本文所使用的降噪手段能够有效改善时域回波信号,降低噪声以突出回波峰值,有利于提取时间间隔进而提升测量精度。此外,BE-EMAR 方法降噪前后的 a_{50} 值可以稳定在 0.30 ~ 0.35 mm 范围内, $a_{90/95}$ 值可以稳定在 0.44 ~ 0.54 mm 范围内,表明该方法对于实验环境中的噪声信号不敏感,降噪前后的 POD 指标始终维持在较低水平,噪声信号对检测结果的影响较小,体现了该方案对于微小厚度测量的抗噪能力。而 ToF 在降噪之后的 $a_{90/95}$ 水平与 BE-EMAR 法降噪之前一致,表明该方案受噪声影响较大,当信噪比过低时,有效回波信号被淹没在噪声信号中,难以识别相邻回波时间间隔,从而影响测量精度。

5 结 论

本文采用 BE-EMAR 方法对 7075 型铝合金试件的板厚进行检出概率研究。将宽频激励作为换能器线圈输入信号,并利用 EMAR 方法对板厚进行测量。在本文中,检出概率指利用 BE-EMAR 方法对某一试件进行厚度检测并准确测量的概率,检出概率与不同厚度的对应关系称为 POD 曲线,其两个重要指标 a_{50} 和 $a_{90/95}$ 体现了该方案的测厚精度。换能器中永磁体按照 Halbach 阵列排布以产生更强的水平磁场,激发出强度更高的纵波。测定了不同信噪比下和降噪之后得到的试件厚度值,进行数据处理并绘制 POD 曲线,可以得出如下结论。

1) 本文所提出的 BE-EMAR 方法,由于换能器线圈中通入的激励采用宽频电流,因此不需要进行扫频操作即可进行谐振频率的提取,对于 7075 型铝合金试件的厚度测量相比于传统的 ToF 测厚具有更高的精确度。

2) 通过改变换能器的提离距离,得到不同信噪比下的 POD 曲线略有差异。横向对比未降噪时 3 种信噪比下 BE-EMAR 法得到的 3 条 POD 曲线,相对应的两个指

标最大差异值为 0.05 mm;纵向对比同一信噪比下降噪前后的对应指标,最大差异值为 0.07 mm,由此说明 BE-EMAR 法降噪前后得到的结果并无较大区别,该方案对于常规噪声信号不敏感,具有良好的抗噪能力。而 ToF 在降噪前后的 POD 曲线指标变化明显,对应 $a_{90/95}$ 数值差异值为 0.21 mm,变化率为 28%,表明噪声信号的加入对于该方案的测量精度影响较大。

3) 降噪前后,BE-EMAR 法得到的 POD 曲线中的 a_{50} 和 $a_{90/95}$ 值均能够稳定在 0.55 mm 以内,体现了该方案对于微小厚度金属试件的测量具有良好的抗噪能力和较高的准确性。

参考文献

- [1] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.
GU D D, ZHANG H M, CHEN H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 32-55.
- [2] 唐志峰,孙兴涛,张鹏飞,等. 集测厚与导波检测于一体的复合式电磁超声换能器研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 98-109.
TANG ZH F, SUN X T, ZHANG P F, et al. Research on composite electromagnetic ultrasonic transducer integrating thickness measurement and guided wave detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 98-109.
- [3] 胡松涛,石文泽,卢超,等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 35-46.
HU S T, SHI W Z, LU CH, et al. Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 35-46.
- [4] LEE J K, KIM Y Y. Tuned double-coil EMATs for omnidirectional symmetric mode Lamb wave generation[J]. NDT & E International, 2016, 83: 38-47.
- [5] NAGY P B, SIMONETTI F, INSTANES G. Corrosion and erosion monitoring in plates and pipes using constant group velocity Lamb wave inspection[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1832-1841.
- [6] 刘素贞,董硕,方正,等. 电磁超声单向表面波对铝板微小缺陷的检测[J]. 声学技术, 2019, 38(3): 290-295.
LIU S ZH, DONG SH, FANG ZH, et al. Tiny defect detection of aluminium plate by electromagnetic ultrasonic

- unidirectional surface wave [J]. Technical Acoustics, 2019, 38(3): 290-295.
- [7] TRUSHKEVYCH O, EDWARDS R S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system [J]. NDT&E International, 2019, 107: 102140.
- [8] KANG L, ZHANG C, DIXON S, et al. Enhancement of ultrasonic signal using a new design of Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer [J]. NDT & E International, 2017, 86: 36-43.
- [9] LIU T H, PEI C X, CHENG X, et al. Adhesive debonding inspection with a small EMAT in resonant mode [J]. NDT & E International, 2018, 98: 110-116.
- [10] 蔡智超, 陈澜, 赵振勇, 等. 电磁声谐振对 Q235 钢压缩形变评价研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 153-160.
- CAI ZH CH, CHEN L, ZHAO ZH Y, et al. Electromagnetic acoustic resonance for plastic deformation in Q235 steel [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 153-160.
- [11] JOO K, HONG J. Development of probability of detection functions for evaluating integrity of axial outside diameter stress corrosion cracks in steam generator [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2015, 52(1): 63-69.
- [12] BILGUNDE P N, BOND L J. Model-assisted approach for probability of detection (POD) in high-temperature ultrasonic NDE using low-temperature signals [J]. Nuclear Technology, 2018, 202: 161-172.
- [13] ALI M S S A, KUMAR A, RAO P B, et al. Bayesian synthesis for simulation-based generation of probability of detection (PoD) curves [J]. Ultrasonics, 2018, 84: 210-222.
- [14] YUSA N, SONG H C, IWATA D, et al. Probabilistic analysis of electromagnetic acoustic resonance signals for the detection of pipe wall thinning [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2019(3): 1-16.
- [15] LI W B, JIANG C, DENG M X. Thermal damage assessment of metallic plates using a nonlinear electromagnetic acoustic resonance technique [J]. NDT&E International, 2019, 108: 102172.
- [16] 沙正晓, 刚铁, 梁菁. 粉末涡轮盘夹杂缺陷的超声检出概率 [J]. 无损检测, 2019, 41(4): 24-29.
- SHA ZH X, GANG T, LIANG J. Ultrasonic inspection POD for inclusions within powder metallurgical turbine disks [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(4): 24-29.
- [17] 周赣, 黄学良, 周勤博, 等. Halbach 型永磁阵列的应用综述 [J]. 微特电机, 2008, 36(8): 52-55.
- ZHOU G, HUANG X L, ZHOU Q B, et al. The applications of the Halbach permanent magnet array: A review [J]. Small & Special Electrical Machines, 2008, 36(8): 52-55.
- [18] 江念, 王召巴, 陈友兴, 等. 电磁超声检测钢板厚度实验的参数优化 [J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 498-502.
- JIANG N, WANG ZH B, CHEN Y X, et al. The experiment parameters of the steel-sheet thickness measurement by electromagnetic ultrasonic [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(4): 498-502.

作者简介



蔡智超 (通信作者), 2010 年于华东交通大学获得学士学位, 2016 年于河北工业大学获得博士学位, 现为华东交通大学副教授, 主要研究方向为电磁传感器, 电磁超声。
E-mail: zccai@foxmail.com

Cai Zhichao (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from East China Jiaotong University in 2010 and Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2016. He is currently an associate professor at East China Jiaotong University. His main research interest includes electromagnetic sensors, electromagnetic ultrasonic.



李毅博, 2018 年于华北水利水电大学获得学士学位, 现为华东交通大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声无损检测。
E-mail: liyibonix@163.com

Li Yibo received his B.Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2018. He is currently an M.Sc. candidate at East China Jiaotong University. His main research interest includes electromagnetic ultrasonic non-destructive testing.