

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108662

# 基于编码压缩的钢板电磁超声 Lamb 波检测方法研究\*

黄祺凯<sup>1</sup>, 石文泽<sup>1,2</sup>, 卢超<sup>1,3</sup>, 陈尧<sup>1</sup>, 董德秀<sup>4</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中科院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190; 3. 赣南师范大学江西省数值模拟与仿真技术重点实验室 赣州 341000; 4. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 沈阳 110043)

**摘要:**针对大型金属板材构件导波检测中 EMAT 分辨率低、SNR 差,难以用于小裂纹检测等难题,建立了基于 Barker 码脉冲压缩技术的 Lamb 波 EMAT 检测过程多物理场有限元模型,以含预制裂纹的 5.6 mm 厚钢板为检测对象,仿真和实验相结合,研究了永磁体宽度和高度、曲折线圈匝数、Barker 码序列长度和码元长度等参数对 EMAT 检测回波的影响,验证了脉冲压缩技术在 Lamb 波 EMAT 检测中的有益效果。结果表明,基于脉冲压缩技术的 EMAT 经优化后,SNR 比传统 tone-burst 激励方式高出了 9.69 dB,可检出 10 mm 长和 0.5 mm 深的小裂纹,缺陷波 SNR 为 23.47 dB。当 Barker 码码元中心频率为 1 MHz 时,脉冲压缩后的 Lamb 波包发生模态分离,但  $A_0$  模态的缺陷波 SNR 仍可达 35.23 dB,这对提升 Lamb 波 EMAT 检测能力具有重要的工程应用价值。

**关键词:** 金属薄板; Lamb 波; EMAT; 脉冲压缩; 优化设计

**中图分类号:** TH878 TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Research on the detection method of the steel plate with Lamb wave EMATs based on phase coded pulse compression

Huang Qikai<sup>1</sup>, Shi Wenze<sup>1,2</sup>, Lu Chao<sup>1,3</sup>, Chen Yao<sup>1</sup>, Dong Dexiu<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. State Key Laboratory of Acoustic Field and Acoustic Information, Academy of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory of Simulation and Numerical Modeling Technology of Jiangxi Province, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China; 4. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**Abstract:** The guided wave EMAT detection of large metal plate components has the problems of low resolution and poor SNR of the EMAT, which is challenging to be used for small crack detection. A multi-physical field finite element model of Lamb wave EMAT detection process based on the Barker code pulse compression technology is established to solve this issue. Taking a 5.6 mm thick steel plate with prefabricated cracks as the detection object, the effects of permanent magnet width and height, meander coil turns, the bit length of Barker code sequence, and subpulse duration on EMAT detection echo are studied by simulations and experiments. The beneficial effect of pulse compression technology in Lamb wave EMAT detection is evaluated. After optimization, results show that the SNR of the EMAT based on pulse compression technology is 9.69 dB higher than that of the traditional tone-burst excitation method. A small crack 10 mm long and 0.5 mm deep can be detected, and the SNR of the defect wave can reach 23.47 dB. When the center frequency of the Barker code subpulse is 1 MHz, the Lamb wave packet after pulse compression presents mode separation. However, the SNR of the  $A_0$  mode defect wave can still reach 35.23 dB, and it has essential engineering application value for improving the detection ability of the Lamb wave EMAT.

**Keywords:** sheet metal; Lamb guided wave; EMAT; pulse compression technique; optimal design

收稿日期: 2021-09-24 Received Date: 2021-09-24

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52065049, 12064001, 51705231)、江西省杰出青年基金(20212ACB214010)、江西省科技厅科技计划项目(20204BCJL22039)、南昌航空大学研究生创新专项资金项目(YC2020069)资助

## 0 引言

钢板是一种常见的工业原料,在建筑、桥梁、高温容器、大型储罐等领域应用广泛,但在各种恶劣复杂的载荷环境产生的裂纹、腐蚀减薄等缺陷,会严重影响其服役的可靠性和安全性。电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducers, EMAT) 通过电磁耦合原理在试样内部激励超声波,适用于高温工件探伤、大型工件检测等快速在线原位检测的特殊场合<sup>[1]</sup>,但其换能效率低限制了其广泛的工程应用。

国内外研究学者针对上述问题,在 EMAT 设计优化和信号降噪算法等方面进行了深入研究。例如,唐志峰等<sup>[2]</sup>设计了一种集测厚与导波检测于一体的复合式 EMAT,其测厚误差小于 0.1 mm,解决了传统超声测厚技术存在的漏检及效率低的难题。Sun 等<sup>[3]</sup>对点聚焦 EMAT 进行正交优化,优化后的回波信号强度比未优化的提高约 400%,且使有效焦距和宽度分别降低了 15% 和 57%。时亚等<sup>[4]</sup>通过正交实验法对表面波 EMAT 进行优化,与传统 EMAT 相比,多根分裂曲折线圈 EMAT 的接收信号幅值可以提高 50.8%。Zhai 等<sup>[5]</sup>设计了一种新型曲折线圈 EMAT,可以用来抑制谐波波长,减弱多模态特性的影响。为了解决高频时 Lamb 波模式数大幅增加的问题,Liu 等<sup>[6]</sup>设计了一种基于倾斜静态磁场的斜入射 EMAT,通过控制永磁体的偏振角提高模式的选择性。此外,Si 等<sup>[7]</sup>提出了一种变模式分解小波方法,可以用于抑制大脱离 EMAT 检测中的高频窄带噪声和常见噪声。Jia 等<sup>[8]</sup>提出了混合替代模型和粒子群优化算法对点聚焦垂直剪切 (SV) 波 EMAT 进行优化,经过优化后,超声回波幅值提高了 12 倍。

脉冲压缩技术最早应用于雷达信号处理,能解决距离分辨率与检测范围之间的矛盾,因此可以将这种技术应用用于空气耦合超声、电磁超声、压电超声等,用于解决信噪比和分辨率差等问题。根据调制方式可将激励信号分为调频信号、相位编码信号、混合调制信号。其中,相位编码信号作为一种离散的伪随机序列,在时宽带宽积较小时,峰值距离旁瓣水平 (peak-sidelobe level, PSL) 较大,拥有良好的脉冲压缩性能,得到了众多研究者的关注<sup>[9-11]</sup>。Fu 等<sup>[12]</sup>提出了一种由线性调频匹配滤波器和失配滤波器组成的线性调频 Barker 码脉冲压缩方法,可将轴向分辨率提高 1 倍,信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 提高约 3 dB。张慧琳等<sup>[13]</sup>将 Barker 码脉冲压缩技术用于长骨超声导波检测,并采用加权匹配滤波器进行解码,压缩后信号幅度是单脉冲激励的 13 倍,而采用 FIR-LS 逆滤波器解码时,PSL 可达 -63.59 dB,旁瓣抑制效果更好。周正干等<sup>[14]</sup>研究了在空气耦合超声检测中

脉冲压缩激励参数的选取问题,发现 13 位 Barker 码激励信号可获得优良的脉冲压缩效果,随单个码元长度增加,主瓣峰值不断提高,而对信号主瓣的识别能力下降。Han 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于 Barker 码激励的双探头超声衍射检测方法,用于确定材料内部倾斜裂纹的尺寸,且能够准确地识别缺陷长度和方向,仿真的方向误差约为 3.06°,而实验对应的最大误差为 4.31°。Zhang 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于编码脉冲压缩的磁声成像方法,当采用 13 位 Barker 码作为激励信号时,SNR 提高 21.5 dB,而在 SNR 相同时,Barker 码脉冲压缩的处理时间比单脉冲缩短了 95.8%。王强等<sup>[17]</sup>提出了一种衰减匹配的超声 Barker 码激励方法,用来增加超声穿透高衰减介质的能力,能有效提高 SNR。宋寿鹏等<sup>[18]</sup>提出了一种基于非线性调频 Barker 码复合编码的脉冲压缩方法,PSL 较 Barker 码、非线性调频信号、线性调频 Barker 码分别降低了约 7.8、7 和 3.6 dB。石文泽等<sup>[19]</sup>采用固体力学模型,建立基于 Barker 码信号激励的钢板 SH 导波传播有限元模型,研究了 Barker 码脉冲压缩技术在钢板腐蚀缺陷电磁超声 SH 导波检测中的应用效果,分析了 Barker 码信号、EMAT 永磁体对数对检测回波的影响。

综上所述,国内外关于将脉冲压缩技术用于 Lamb 波 EMAT 检测的研究相对较少,同时在 Barker 码激励信号选择与 EMAT 设计参数优化等方面,有待进一步完善。建立基于 Barker 码脉冲压缩的 Lamb 波 EMAT 有限元模型,应用单因素法,对 EMAT 设计参数、Barker 码激励信号进行最优化选取。通过实验分析优化后 EMAT 的小缺陷检测能力,以及永磁体高度对缺陷波 SNR 的影响。与传统 tone-burst 激励方式进行对比,验证了 Barker 码脉冲压缩技术在小缺陷 Lamb 波快速检测中的应用优势。

## 1 曲折线圈 EMAT 检测过程数值建模

### 1.1 曲折线圈 EMAT 换能机理及工作点选取

图 1 为曲折线圈 EMAT 的洛伦兹力换能机理。当曲折线圈通以高频激励电流  $I_e$  后,在试样表面产生频率相同、方向相反的感应电涡流  $J_e$ 。电涡流在偏置磁场  $B_s$  和交变磁场  $B_d$  作用下产生洛伦兹力  $F_L$ ,其表达式如下<sup>[20-21]</sup>:

$$F_L = J_e \times (B_s + B_d) \quad (1)$$

当超声波返回至被测试样表面,将引起带电粒子的振动,并在偏置磁场  $B_s$  作用下产生动态电流密度<sup>[22]</sup>,动态电流会在试样内部及周围产生动态磁场,并在接收线圈中产生感应电动势<sup>[21]</sup>。

5.6 mm 厚钢板的 Lamb 导波频散曲线如图 2 所示,当超声波波长  $\lambda$  与钢板厚度  $h$  接近时,超声波受到上下界面

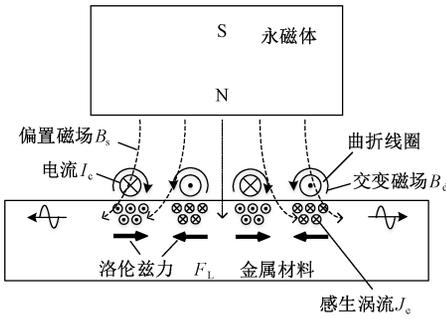


图 1 曲折线圈 EMAT 洛伦兹力换能机理  
Fig. 1 Meander coil EMAT conversion mechanism based on Lorentz forces

限制, 发生反射、折射、耦合后形成 Lamb 导波<sup>[23]</sup>。从式(1)可知, 洛伦兹力方向与静态偏置磁场、交变磁场方向有关。当质点振动以面内位移为主时, 主要产生对称模式(S)导波, 而当以面外位移为主时, 主要产生反对称模式(A)<sup>[24]</sup>。根据 Lamb 波频散曲线可知, 选取工作频率为 0.25 MHz 时, 低于  $A_1$  模态截止频率, 可激发以  $A_0$  模态为主的导波<sup>[25]</sup>。 $A_0$  模态对应的波长  $\lambda$  为 10.28 mm 时, 因此, 曲折线圈相邻导线间距  $d = \lambda/2$ , 即为 5.14 mm。

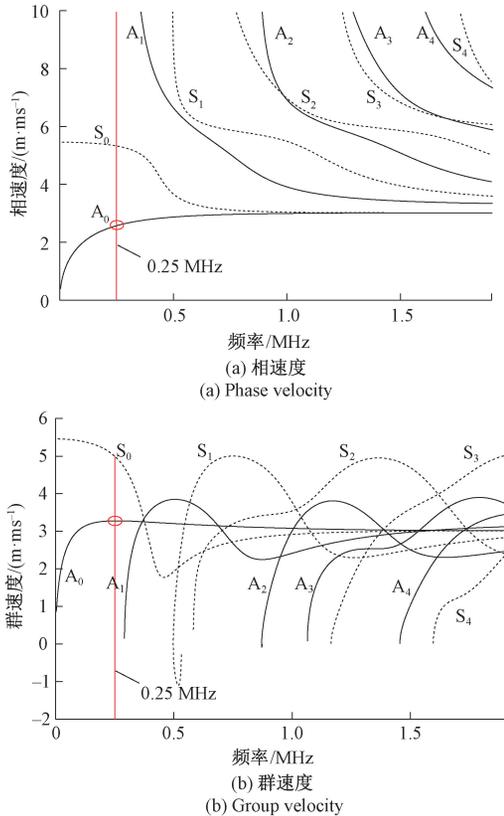


图 2 钢板中 Lamb 波频散曲线  
Fig. 2 Dispersion curves of Lamb guided waves of thick steel plate

### 1.2 曲折线圈 EMAT 有限元模型及设计参数

建立如图 3 所示的 Lamb 波 EMAT 检测过程多物理场有限元模型, 主要参数如表 1 所示, 其中曲折线圈导线高度为 1 oz。图 3(a) 和 (b) 为曲折线圈 EMAT、含缺陷的金属试样处的局部网格细化。永磁体、金属试样均采用映射网格, 线圈、空气域和缺陷附近区域则采用自由三角形网格。永磁体、空气域、线圈和试样区域的最大网格单元尺寸分别为 0.5、2、0.017 5 和 0.2 mm。在试样表面设置厚度为 0.2 mm 的换能区域, 并采用 5 个边界层网格进行细化, 第 1 层网格厚度为 0.005 2 mm, 网格增长率为 1.2。当瞬态求解器的最大时间步长满足  $1/100f$  时, 仿真结果收敛。

图 3(c) 为永磁体的偏置磁场强度, 图 3(d) 为集肤层内的感应涡流密度, 相邻导线对应的电涡流大小相同、方向相反。图 3(e) 和 (g) 为 12  $\mu$ s 时, 超声波传播过程中的  $y$  方向位移和  $x$  方向位移云图。图 3(f) 和 (h) 为 71  $\mu$ s 时, 超声波与缺陷相互作用过程中的  $y$  方向位移和  $x$  方向位移云图。由 Lamb 波的波结构可知其传播过程中主要为  $A_0$  模态。

表 1 有限元建模参数

Table 1 Parameters in the finite element model

变量	数值	变量	数值
钢板长度/mm	300	纵波声速/( $m \cdot s^{-1}$ )	5 960
钢板厚度/mm	5.6	横波声速/( $m \cdot s^{-1}$ )	3 260
永磁体宽度/mm	68.5~102.8	线圈匝数	4~10
永磁体高度/mm	10~50	导线分裂数	2~6
导线宽度/mm	0.15	导线间距/mm	0.3
裂纹深度/mm	0.5~3	裂纹宽度/mm	1
钢板密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	7 932	永磁体磁导率	1.04
钢板磁导率	100	永磁体电导率/( $MS \cdot m^{-1}$ )	0.714
钢板电导率/( $MS \cdot m^{-1}$ )	8.4	永磁体剩磁强度/T	1.2
导线磁导率	1	导线电导率/( $MS \cdot m^{-1}$ )	26.67

### 1.3 Barker 码脉冲算法实现及旁瓣抑制

Barker 码是一种实用的相位编码, 通过时域非线性相位调节展宽信号频谱, 并经匹配网络后压缩, 使接收信号兼具高距离分辨率和强检测能力<sup>[26]</sup>。图 4(a) 为 13 位 Barker 码激励信号, 其二进制序列为  $\{1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1\}$ , 并采用中心频率为 0.25 MHz、持续时间为 12  $\mu$ s 的码元, 作为图 3 中有限元模型的

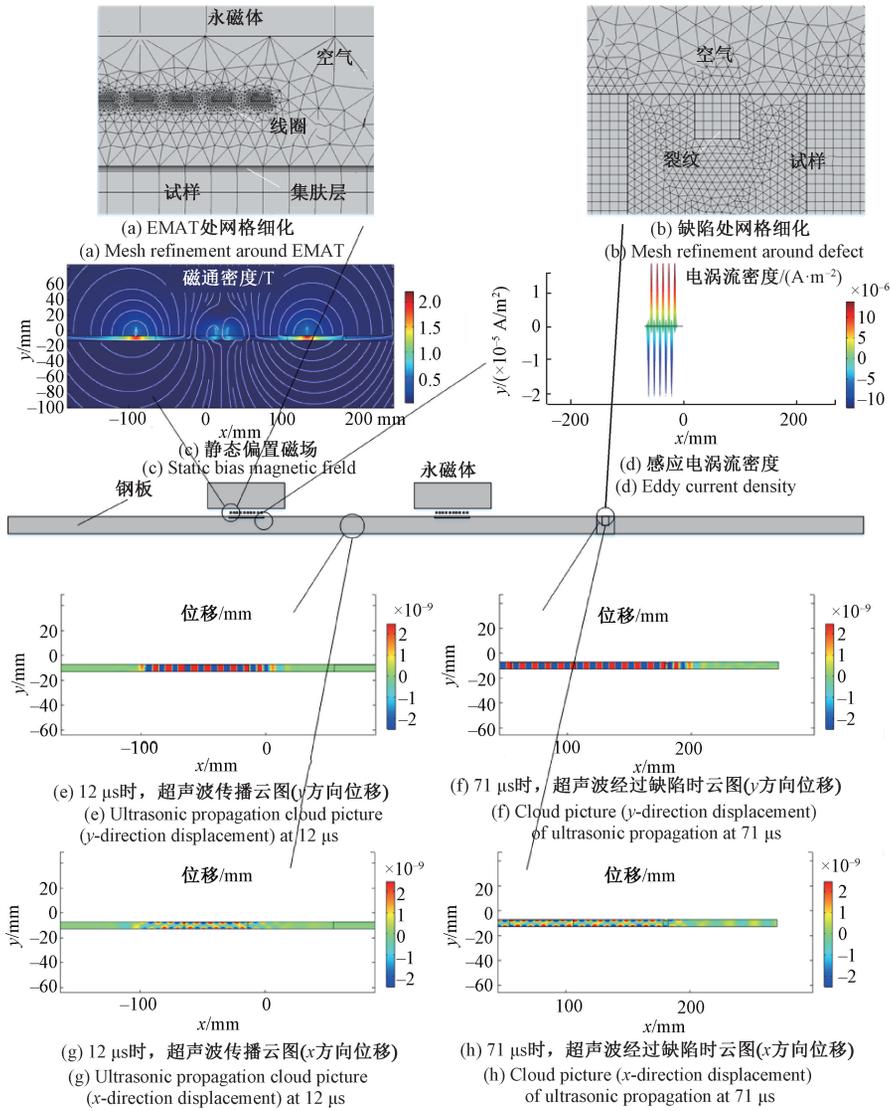


图3 Lamb波EMAT检测过程有限元模型

Fig. 3 Finite element model of Lamb guided wave detection process

激励电流。激励信号  $u[m]$  和码元序列  $v[s]$  可以表示为<sup>[27]</sup>：

$$u[m] = \sum_{k=0}^{N-1} C_k v[m - kM], m = 0, 1, 2, \dots, LM - 2, LM - 1 \quad (2)$$

$$v[s] = \begin{cases} f\left(\frac{sT_c}{M-1}\right), & s = 0, 1, 2, \dots, M-2, M-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $L$ 为Barker码码长， $M$ 为子脉冲时间宽度， $T_c$ 为码元持续时间， $C_k = \pm 1$ 为Barker码编码序列。

采用时域脉冲压缩算法，得到的脉压信号  $y[m]$  如下<sup>[27]</sup>：

$$y[m] = u[m] * s[m] \quad (4)$$

式中： $s[m]$ 为采用激励信号  $u[m]$  时EMAT接收到的超声回波信号。

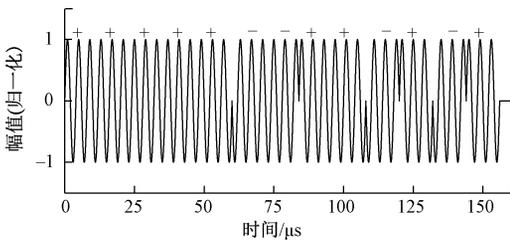
图4(b)为有限元模型计算得到的开路感生电压经脉冲压缩以后的信号。由于匹配滤波器在压缩信号宽度之外也会产生响应，主瓣两侧产生对称的距离旁瓣，干扰缺陷信号识别。如图4(b)所示，仅可识别直达波，端面反射波信号，缺陷波淹没在旁瓣中。因此，有必要进一步抑制距离旁瓣以提高缺陷检测分辨率。

由于旁瓣呈左右对称，因此，加权因子系数也是对称的。当码元序列长度  $N = 13$  时，可得如式(5)所示方程组。

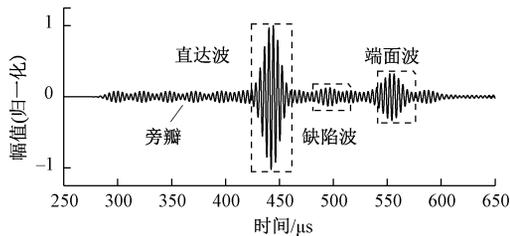
$$\begin{cases} 13\beta_0 + 2\beta_1 + 2\beta_2 + 2\beta_3 + 2\beta_4 + 2\beta_5 + 2\beta_6 = 13 \\ \beta_0 + 14\beta_1 + 2\beta_2 + 2\beta_3 + 2\beta_4 + 2\beta_5 + 2\beta_6 = 0 \\ \beta_0 + 2\beta_1 + 14\beta_2 + 2\beta_3 + 2\beta_4 + \beta_5 + \beta_6 = 0 \\ \beta_0 + 2\beta_1 + 2\beta_2 + 14\beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 = 0 \\ \beta_0 + 2\beta_1 + 2\beta_2 + \beta_3 + 13\beta_4 + \beta_5 + \beta_6 = 0 \\ \beta_0 + 2\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + 13\beta_5 + 2\beta_6 = 0 \\ \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

求解上述方程组,可得相应加权系数  $\beta_0 - \beta_6$ 。

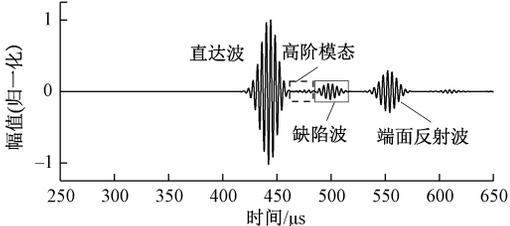
图4(c)为引入加权因子后,旁瓣抑制后信号,可识别原先淹没在旁瓣中的缺陷波。以13位Barker码为例,以主瓣为中心的  $-12 T_s < T < 12 T_s$  范围内的旁瓣为0,其中  $T_s$  为码元的持续时间<sup>[13]</sup>。在实际应用中,也可以通过在匹配滤波器后级联旁瓣抑制滤波器实现。采用中心频率为0.25 MHz的激励信号,可减弱Lamb波中  $S_0$  模式对缺陷识别的影响。



(a) 13位Barker码激励电压  
(a) Excitation current of 13-bit Barker code signal



(b) 开路感生电压信号经脉冲压缩  
(b) Pulse compression of open-circuit induced voltage signal



(c) 开路感生电压信号经脉冲压缩和旁瓣抑制  
(c) Pulse compression and sidelobe suppression of open-circuit induced voltage signal

图4 Barker码脉冲压缩技术及旁瓣抑制

Fig. 4 Barker code pulse compression technology and sidelobe suppression

## 2 基于 Barker 码脉冲压缩的曲折线圈 EMAT 优化设计

### 2.1 Barker 码参数对脉压信号的影响

Barker 码序列长度、码元长度、永磁体宽度、永磁体高度、线圈匝数、导线分裂数、缺陷深度等设计参数会影响脉压信号的PSL及波包宽度,因此采用单因素法逐个分析其影响规律。

Barker 码码元长度、序列长度是影响 Barker 码脉冲压缩性能的主要因素。在其他参数相同情况下,分别用5、7、13位Barker码信号进行仿真研究,结果如图5所示。由图5可知,序列长度增加会使激励信号的持续时间增加,但3种位数Barker码信号对应的缺陷波包宽度均约为31 μs,可知相应的压缩比分别为1.9、2.7、4.9,因此,序列长度为13的Barker码信号具有最好的脉冲压缩性能。由于13位Barker码信号的PSL优于较短序列,故在实际检测时应以13位序列为主。

图6为不同码元长度对Barker码脉冲压缩性能的影响。码元长度4、8、12 μs对应的压缩比分别为2.8、3.8、4.9。当码元长度由4 μs增加至12 μs,PSL提升4.62 dB。码元长度增加可提升Barker码脉冲压缩性能。当码元长度为4 μs,高阶模态严重干扰缺陷识别,而在码元长度8 μs时高阶模态仍干扰缺陷识别,故应选取码元长度为12 μs的Barker码信号,减少高阶模态的影响,以提高缺陷检测的分辨率。

### 2.2 EMAT 激励/设计参数对脉压信号的影响

图7为EMAT激励/设计参数对脉冲压缩后主瓣峰值及波包宽度的影响。以永磁体宽度102.8 mm、永磁体高度50 mm、线圈匝数10匝、导线分裂数6、码元中心频率0.25 MHz、码元长度12 μs、13位Barker码为原始取值,检测对象为1 mm宽、1 mm深的裂纹,采用单因素法进行分析。各个变量的取值范围为:永磁体宽度:68.5、85.7、102.8 mm;永磁体高度:10、20、30、40、50 mm;线圈匝数:4、6、8、10匝;导线分裂数:2、4、6;缺陷深度:0.5、1、2、3 mm。

由图7(a)和(b)可知,永磁体宽度和高度的变化对缺陷波的波包宽度影响较小,而永磁体高度的增加,会使偏置磁场强度增加,因此缺陷波幅值随之增加,且永磁体宽度过大,不利于提高缺陷波幅值。由图7(c)和(d)可知,线圈匝数与导线分裂数均对缺陷波幅值有较大影响,幅值随线圈匝数、导线分裂数的增加而增加,但对波包宽度的影响不显著。图7(e)中缺陷深度对缺陷波幅值也有较大影响。由于不同深度缺陷导致的Lamb波频散程度不同,因此波包宽度随着深度变化也表现为显著变化。

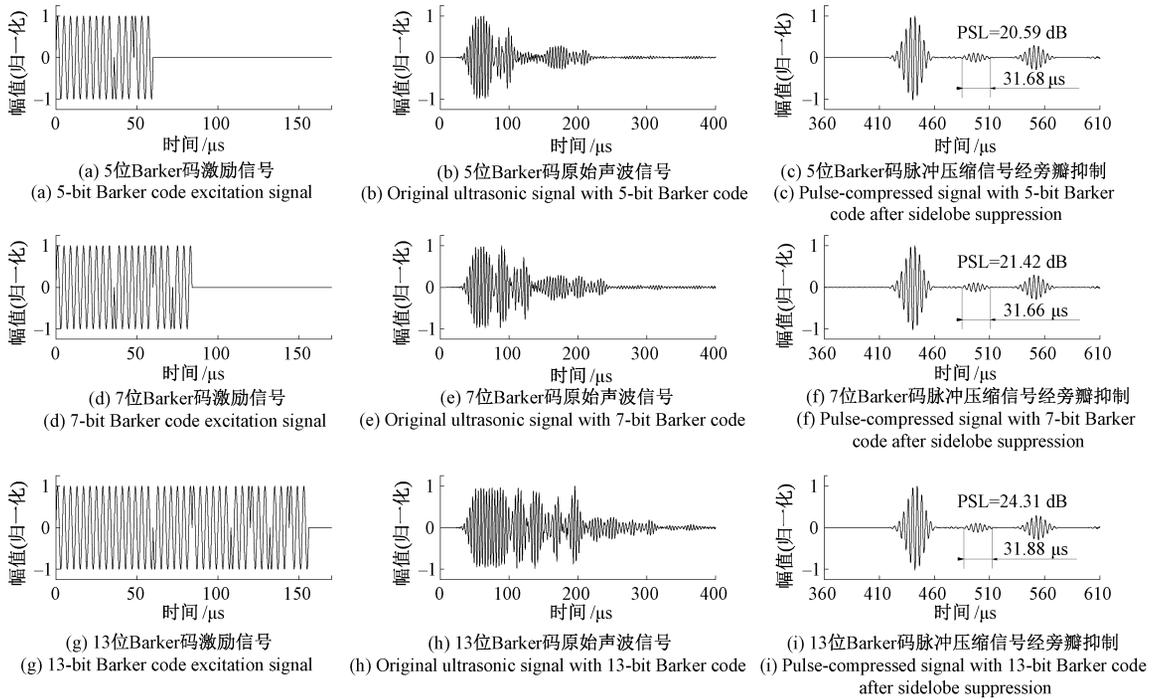


图5 Barker码序列长度对脉冲压缩后超声波的主瓣宽度和PSL的影响

Fig. 5 Effects of Barker code bit length on main lobe width and PSL of ultrasonic waves after pulse compression

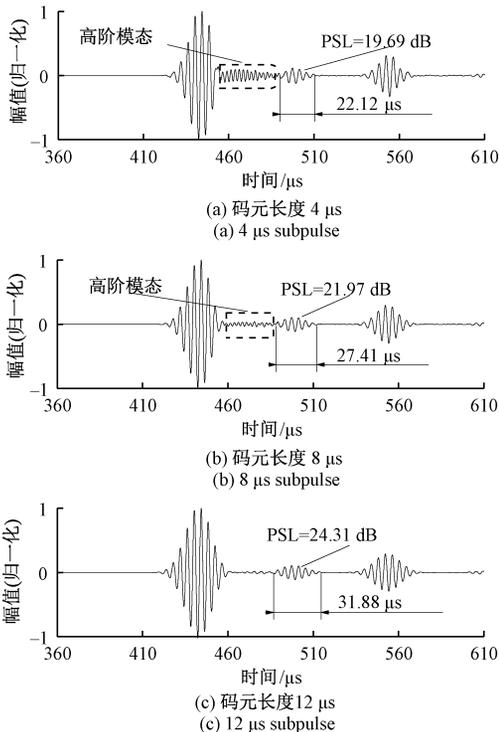


图6 Barker码码元长度对脉冲压缩后超声波的主瓣宽度和PSL的影响

Fig. 6 Effect of subpulse length of Barker code on main lobe width and PSL of ultrasonic waves after pulse compression

考虑到 Lamb 波检测回波的 SNR, 优化后的 EMAT 激励设计参数为: 序列长度为 13 位, 码元长度为  $12 \mu\text{s}$ , 永磁体的宽度和高度分别为 60、50 mm, 曲折线圈匝数为 10 匝, 导线分裂数为 6。

图 8 为码元中心频率 1 MHz、持续时间  $130 \mu\text{s}$  的 13 位 Barker 码脉冲信号。码元中心频率为 1 MHz 的 Lamb 导波在遇到深度 1 mm 的裂纹时, 单一波包将频散成多种模式导波<sup>[28-29]</sup>, 这会降低缺陷检测的空间分辨率, 但在 5.6 mm 厚的钢板导波检测中, 多模态干扰相对较小, 所以也可以采用码元中心频率为 1 MHz 的 Barker 码信号作为 EMAT 的激励信号。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验系统

钢板电磁超声检测系统如图 9 所示, 信号发生器发射特定频率的 Barker 码信号, 经由功率放大器放大后, 再通过激励端阻抗匹配阻抗变换后, 最后加载到激励端 EMAT。接收 EMAT 的电压信号通过接收端阻抗匹配、滤波器、前置放大器后, 经由采集卡进行数模转换, 最终在 PC 上显示超声回波。实验采用一发一收的工作方式, 减小偏置磁场方向对 Lamb 波模式的影响<sup>[30-31]</sup>, 曲折线圈长度和宽度分别为 51.4、40 mm, 线圈匝数为 10 匝, 导线分裂数为 6, 匝间距为 5.14 mm, 永磁体尺寸为 60 mm 长×40 mm 宽×50 mm 高。

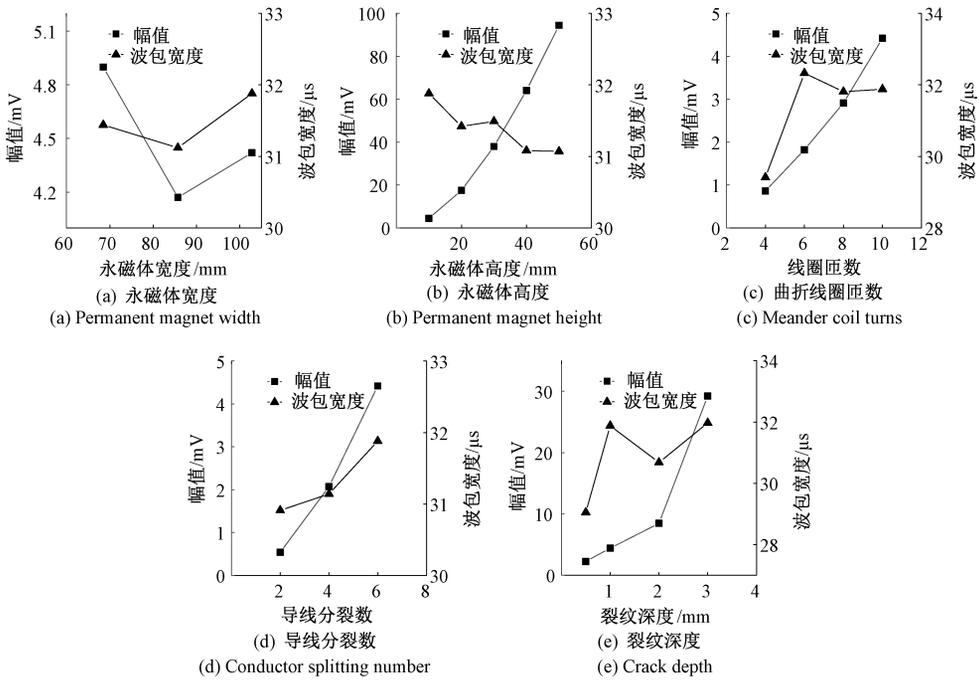


图 7 EMAT 激励/设计参数对脉冲压缩后信号的主瓣峰值及波包宽度的影响

Fig. 7 Effect of EMAT excitation/design parameters on main lobe peak and wave packet width of pulse-compressed signal

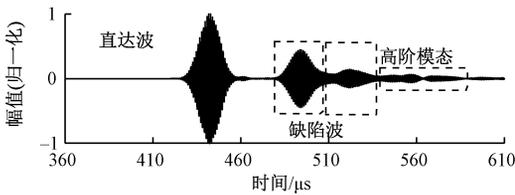


图 8 码元频率为 1 MHz、持续时间为 130 μs 的 13 位 Barker 码脉压信号

Fig. 8 13-bit Barker code pulse-compressed signal with a 1 MHz subpulse and 130 μs duration

### 3.2 Barker 码信号参数实验验证

图 10 为 Barker 码信号序列长度对脉冲压缩后超声信号的影响。采用码元中心频率 0.25 MHz 的 5、7、13 位 Barker 码信号来激发优化后的 Lamb 波 EMAT, 并对深度 1 mm 的裂纹进行检测。如图 10 所示, 第 1 个波包为缺陷波, 第 2、3 个波包为端面波。Barker 码序列长度由 5 位增加至 13 位, 对应的缺陷波 SNR 则由 24.44 dB 增加至 35.50 dB。因此, 增加序列长度可以有效提高 Lamb 波 EMAT 的检测能力。

图 11 为码元长度对脉冲压缩后超声信号影响。当码元长度由 4 μs 增至 12 μs 时, 波包宽度增加了

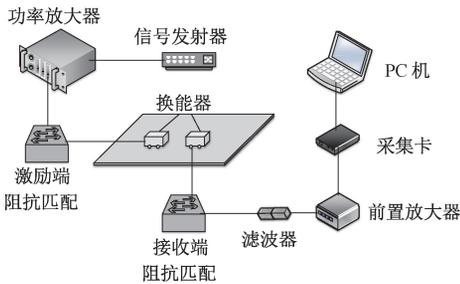
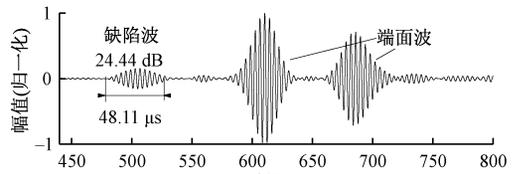


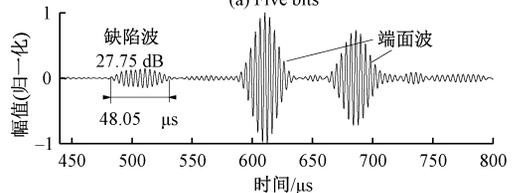
图 9 钢板电磁超声检测实验系统

Fig. 9 EMAT experiment system for steel plate

Barker 码激励参数对直达波、缺陷波等波包的影响规律是相同<sup>[19]</sup>, 但本研究旨在研究提高缺陷检测能力, 因此, 主要分析 Barker 码激励参数对缺陷波包的影响规律。



(a) Five bits



(b) Seven bits

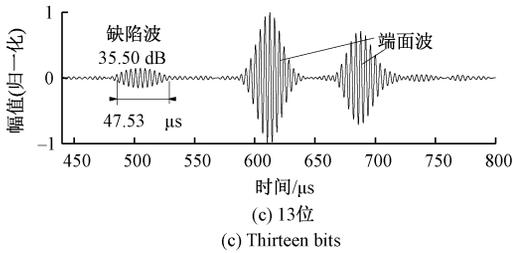


图 10 Barker 码序列长度对脉冲压缩后的实验超声波的波包宽度和 SNR 的影响

Fig. 10 Influence of Barker code bit length on the packet width and SNR of the experimental ultrasonic signal after pulse compression

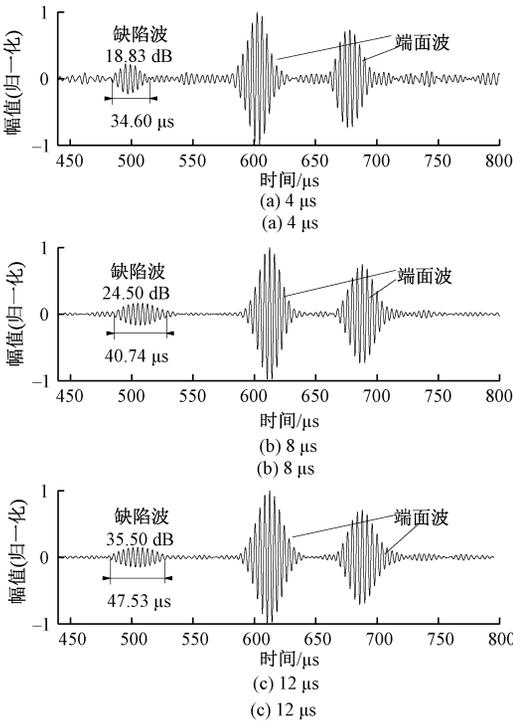


图 11 Barker 码码元长度对脉冲压缩后的实验超声波的波包宽度和 SNR 的影响

Fig. 11 Effect of subpulse length of Barker code on the packet width and SNR of the experimental ultrasonic signal after pulse compression

12.93  $\mu\text{s}$ , 且高阶模态导波显著减少, SNR 增加了 16.67 dB。因此采用码元长度 12  $\mu\text{s}$  的 13 位 Barker 信号, 可以有效提高缺陷检测的 SNR 和抑制高阶模态导波。

### 3.3 永磁体高度对 SNR 和波包宽度的影响

图 12 为永磁体高度对脉冲压缩后的缺陷波的波包宽度和 SNR 的影响。永磁体高度为 10 mm 时, 噪音信号严重影响缺陷识别, 而当永磁体高度增加至 30 mm, 波包

宽度保持稳定, 约为 47  $\mu\text{s}$ , 但缺陷波 SNR 提高了 21.84 dB。因此, 在不考虑 EMAT 体积的条件下, 增加永磁体高度可以提高检测能力。

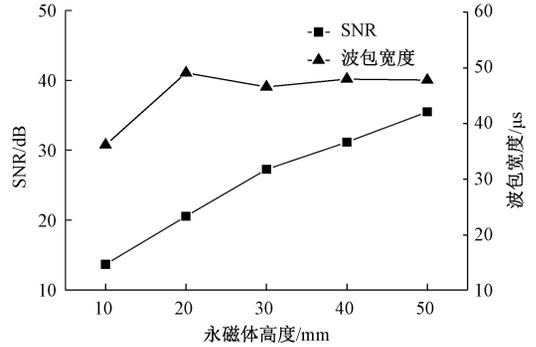


图 12 永磁体高度对脉冲压缩后的缺陷波的波包宽度和 SNR 的影响

Fig. 12 Effect of magnet height on the packet width and SNR of defect echo after pulse compression

### 3.4 优化后 EMAT 裂纹检测及快速检测

图 13 为优化后的曲折线圈 EMAT 对 10 mm 长、1 mm 宽和 0.5 mm 深裂纹的检测回波。由图 13 可知, 基于 Barker 码脉冲压缩技术的优化后 EMAT 能够检出 10 mm 长、1 mm 宽和 0.5 mm 深的小裂纹, 且缺陷回波  $\text{SNR} \geq 23.47 \text{ dB}$ 。

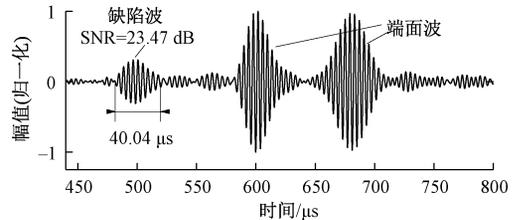


图 13 优化后 EMAT 裂纹检测回波

Fig. 13 Detection echo of crack by the optimized EMAT

图 14 为中心频率 0.25 MHz 的 tone-burst 激励时, 同步平均次数对缺陷波 SNR 的影响, 检测对象为 10 mm 长、1 mm 宽和 1 mm 深的裂纹。当平均次数为 128 时, SNR 可达 25.81 dB, 但所需检测时间大幅度增加, 而采用码元中心频率 0.25 MHz, 码元长度 12  $\mu\text{s}$  的 13 位 Barker 码脉冲压缩技术在无同步平均时, SNR 可达 35.5 dB, 与前者相比, SNR 显著提高了 9.69 dB。采用 Barker 码脉冲压缩技术, Lamb 波 EMAT 的检测回波 SNR 仍高于经过 128 次同步平均的 Tone-burst 激励方式对应的 SNR, 这说明在缺陷检测中, 脉冲压缩技术具有更高的检测能力<sup>[32]</sup>, 且无需过多的同步平均次数, 使这种技术在对大规格金属板材在线快速导波检测中具有重要的应用价值。

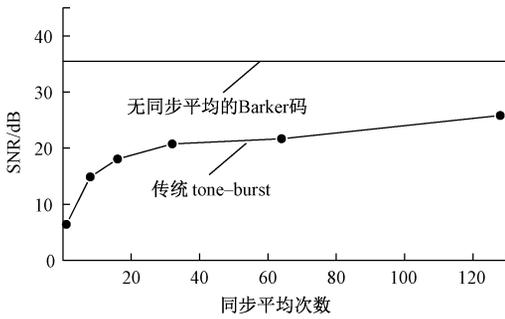


图 14 Tone-burst 激励时,同步平均次数对缺陷波 SNR 的影响

Fig. 14 Effect of the synchronous averaging number on defect echo SNR with tone-burst excitation

当 Barker 码的码元中心频率为 1 MHz 时,裂纹尺寸为 10 mm 长、1 mm 宽和 1 mm 深,实验获得的 Lamb 波信号如图 15 所示。在该频率激励下,缺陷波呈现两个模式,分别是  $S_0$  和  $A_0$ ,且  $A_0$  模式缺陷波的 SNR 可达 35.23 dB。在 5.6 mm 厚的钢板导波检测中,1 MHz 频率对应的多模态干扰相对较小,所以采用码元中心频率为 1 MHz 的 Barker 码信号作为 EMAT 的激励信号并进行脉冲压缩,也可以实现对 10 mm 长、1 mm 宽和 1 mm 深的裂纹检测。

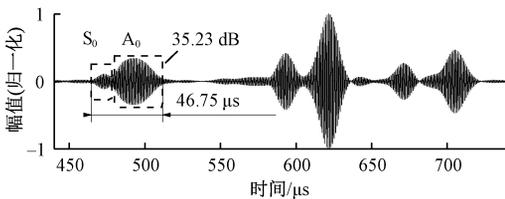


图 15 码元频率 1 MHz 的 13 位 barker 码脉冲信号

Fig. 15 Pulse-compressed signal with 13-bit Barker code with 1 MHz subpulse

## 4 结 论

永磁体高度、曲折线圈匝数、导线分裂数、Barker 码序列长度、码元长度均对 EMAT 检测回波信噪比有显著影响。永磁体宽度和高度的变化对缺陷波的波包宽度影响较小,而永磁体高度的增加,会使缺陷波信噪比随之而增大,但永磁体宽度过大,不利于提高缺陷波幅值。缺陷波信噪比随着线圈匝数、导线分裂数的增加而增加,但对缺陷波的波包宽度影响不显著。

基于 Barker 码脉冲压缩技术的优化后 Lamb 波 EMAT,能够在无同步平均条件下,实现对大规格金属板材构件的快速导波检测,且与 128 次同步平均的传统 tone-burst 激励方式相比,缺陷波 SNR 提高了 9.69 dB;能

够实现对 10 mm 长、0.5 mm 深的小裂纹检测,缺陷波 SNR 可达 23.47 dB。当码元频率为 1 MHz 时也可以得到较高信噪比的缺陷波。

Barker 码脉冲压缩对功率放大器等设备具要求较高,以 Retic 产品 GA2500A 为例,最大脉冲持续时间为 200  $\mu$ s,对 Barker 码信号持续时间有限制,下一步考虑对 Lamb 波 EMAT 进行设计,通过 tone-burst 激励直接获取具有 Barker 码信号特点的超声波,不仅可以提升 Lamb 波检测的 SNR 及空间分辨率,还可以降低对功放设备占空比和稳定性的需求。

## 参考文献

- [1] 翟国富,梁宝,贾文斌,等. 骨架型电磁超声相控阵换能器设计[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2788-2795.  
ZHAI G F, LIANG B, JIA W B, et al. Design of skeleton-type electromagnetic ultrasonic phased array transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2788-2795.
- [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] SUN H Y, HUANG S L, WANG Q, et al. Orthogonal optimal design method for point-focusing EMAT considering focal area dimensions [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 312:112109.
- [4] 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.
- [5] ZHAI G F, JIANG T, KANG L. Analysis of multiple wavelengths of Lamb waves generated by meander-line coil EMATs[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2): 632-636.
- [6] LIU Z H, ZHAO X, LI J Q, et al. Obliquely incident EMAT for high-order Lamb wave mode generation based on inclined static magnetic field [J]. NDT & E International, 2019, 104: 124-134.
- [7] SI D, GAO B, GUO W, et al. Variational mode decomposition linked wavelet method for EMAT denoise with large lift-off effect [J]. NDT & E International,

- 2019, 107: 102149.
- [ 8 ] JIA X J, LIANG J, ZHAO K, et al. Multi-parameters optimization for electromagnetic acoustic transducers using surrogate-assisted particle swarm optimizer [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 152: 107337.
- [ 9 ] 郑阳, 何存富, 吴斌. Chirp 信号及其在超声导波检测中的应用 [ J ]. 仪器仪表学报, 2013, 34 ( 3 ): 552-558.
- ZHENG Y, HE CH F, WU B. Chirp signal and its application in ultrasonic guided wave inspection [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 552-558.
- [ 10 ] YU Z F, ZHOU G, LI Y Z, et al. Performance improvement of magneto-acousto-electrical tomography for biological tissues with sinusoid-Barker coded excitation [ J ]. Chinese Physics B, 2018, 27 ( 9 ): 350-357.
- [ 11 ] HIRATA S, LEOW C H, TOULEMONDE M E G, et al. Selection on Golay complementary sequences in binary pulse compression for microbubble detection [ J ]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60 ( 6 ): 066501.
- [ 12 ] FU J, WEI G, HUANG Q, et al. Barker coded excitation with linear frequency modulated carrier for ultrasonic imaging [ J ]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 13: 306-312.
- [ 13 ] 张慧琳, 宋小军. Barker 码激励超声导波在长骨检测中的应用 [ J ]. 声学学报, 2014, 39(2): 257-263.
- ZHANG H L, SONG X J. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves to long bone detection [ J ]. Chinese Journal of Acoustics, 2014, 39(2): 257-263.
- [ 14 ] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 空气耦合超声检测中脉冲压缩方法的参数选优 [ J ]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 1-7.
- ZHOU ZH G, MA B Q, SUN ZH M, et al. Parameter optimization of pulse compression method in air-coupled ultrasonic testing [ J ]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 1-7.
- [ 15 ] HAN Q B, WANG P, ZHENG H. Modified ultrasonic time-of-flight diffraction testing with Barker code excitation for sizing inclined crack [ J ]. Applied Acoustics, 2018, 140: 153-159.
- [ 16 ] ZHANG S Q, ZHOU X Q, LIU S K, et al. Research on barker coded excitation method for magneto-acoustic imaging [ J ]. Biomedical Signal Processing and Control, 2018, 39: 169-176.
- [ 17 ] 王强, 毛捷, 丁晓东, 等. 衰减匹配的超声 Barker 码激励方法 [ J ]. 声学学报, 2020, 45(2): 227-234.
- WANG Q, MAO J, DING X D, et al. Ultrasonic Barker-code excitation method with attenuation matching [ J ]. Chinese Journal of Acoustics, 2020, 45(2): 227-234.
- [ 18 ] 宋寿鹏, 乔梦丽. 基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷超声检测方法研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 246-254.
- SONG SH P, QIAO M L. Research on ultrasonic testing of plate weld flaw based on NLFM Barker coded excitation method [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 246-254.
- [ 19 ] 石文泽, 黄祺凯, 卢超, 等. 编码压缩在钢板电磁超声 SH 导波检测中的应用 [ J/OL ]. 北京航空航天大学学报, 2021: 1- 14 [ 2021-09-14 ]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0229>.
- SHI W Z, HUANG Q K, LU CH, et al. Application of compression technology in the steel plate detection with SH guided wave EMATs [ J/OL ]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021: 1-14 [ 2021-09-14 ]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0229>.
- [ 20 ] 何健鹏, 徐科, 任威平. 线圈自激励电磁超声换能器设计及特性研究 [ J ]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 134-140.
- HE J P, XU K, REN W P. EMAT design of self-excitation with coils and its characteristics study [ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 134-140.
- [ 21 ] 王淑娟, 李智超, 李鹏展, 等. 非铁磁材料表面波电磁超声换能器接收性能分析与优化设计 [ J ]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2360-2365.
- WANG SH J, LI ZH CH, LI P ZH, et al. Receiving performance analysis and optimal design of surface wave electromagnetic acoustic transducers in nonferromagnetic materials [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2360-2365.
- [ 22 ] JIAN X, DIXON S, QUIRK K, et al. Electromagnetic acoustic transducers for in-and out-of plane ultrasonic wave detection [ J ]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 148(1): 51-56.
- [ 23 ] VICTOR G. Tuned lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring [ J ]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(4): 291-305.
- [ 24 ] SAITO O, YU F M, OKABE Y. Dispersion relation of Lamb waves in cross-ply composite laminates using multi-layered models [ J ]. Composite Structures, 2021,

- 264(10): 113691.
- [25] 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 excitation method of single-mode lamb wave based on electromagnetic acoustic double transducer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 140-147.
- [26] OSIPOV K A, PROSVIRIAKOVA L V, DMITRIEV A A. The study on the possibility of forming quadrature components based on Barker codes [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1691(1): 012046.
- [27] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 相位编码脉冲压缩方法在空气耦合超声检测信号处理中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 48-54.  
ZHOU ZH G, MA B Q, SUN ZH M, et al. Application of phase coded pulse compression method to air-coupled ultrasonic testing signal processing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 48-54.
- [28] GAO G J, CHEN H, HU N, et al. Experimental observation of static component generation by Lamb wave propagation in an elastic plate [J]. Ultrasonics, 2021, 117: 106537.
- [29] 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.
- [30] 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.  
GUO ZH H, LI S S, HE H M, et al. Research on single mode excitation method of Lamb wave based on electromagnetic ultrasonic transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 253-260.
- [31] 刘素贞, 武云海, 张闯, 等. 静态偏置磁场强度对铁磁材料电磁超声换能机制的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2148-2154.  
LIU S ZH, WU Y H, ZHANG CH, et al. Effect of static bias magnetic field on electromagnetic ultrasonic transducer mechanism in ferromagnetic materials [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2148-2154.

- [32] YI Q, TIAN G Y, MALEKMOHAMMADI H, et al. New features for delamination depth evaluation in carbon fiber reinforced plastic materials using eddy current pulse-compression thermography [J]. NDT & E International, 2019, 102: 264-273.

## 作者简介



**黄祺凯**, 2019 年于南昌航空大学获学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 1589635674@qq.com

**Huang Qikai** received his B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2019. He is currently a master student at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.



**石文泽** (通信作者), 2009 年于内蒙古工业大学获学士学位, 2011 年于中南大学获硕士学位, 2017 年于中南大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

**Shi Wenzhe** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, received his M.Sc. degree from Central South University in 2011, and received his Ph.D. from Central South University in 2017. He is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.



**卢超**, 1995 年于江西师大获学士学位, 1998 年于中国科技大学获硕士学位, 2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchaoniat@163.com

**Lu Chao** received his B.Sc. degree from Jiangxi Normal University in 1995, received his M.Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998, and received his Ph.D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests are ultrasonic non-destructive testing and instrument design.