

# 正交互补二相序列的单次超声激励方法 在电磁超声检测中的应用

刘增华<sup>1</sup>, 程进杰<sup>2</sup>, 郭彦弘<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学信息学部 北京 100124;

2. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124)

Email: liuzenghua@bjut.edu.cn

**摘要:** 传统单脉冲激励的超声信号能量低, 传统 Barker 码信号编码长度有限, 正交互补二相序列采用双次激励和接收的方式, 存在增加检测结果误差并降低检测效率的问题。针对上述问题, 本文提出一种单次激励与解码的方式, 将该方式用于电磁超声检测中, 通过单次激励互补 A 码的方式求取对应的互补 B 码, 并从理论和实验上验证了该方法编码和解码的可行性。实验结果表明, 该方法可有效避免双次激励带来的问题并提高在线快速检测能力, 同时在编码激励的波形选择上有更多的可选项。

**关键词:** 电磁超声; 单次激励; 互补二相序列; 编码; 解码

## 1、研究背景

金属材料如碳钢、不锈钢、铝合金等因可塑性强、耐久度高等优点被广泛应用于航空航天、压力容器等工业领域<sup>[1]</sup>。长期在高温、高压等严苛工况下服役, 金属材料内部容易产生裂纹, 采取有效的检测手段及时发现并剔除含缺陷的部件, 对后续服役装备的安全可靠运行十分重要。

电磁超声检测技术通过电磁耦合方式激励和接收超声波, 其因非接触、衰减小、适宜粗糙表面等优点广泛用于复杂工况的检测<sup>[2]</sup>。但其换能效率较低, 接收的信号幅值仅为几微伏, 实际检测中受限于仪器的脉冲功率输出, 难以通过增加仪器发射峰值功率的方式增加信号信噪比, 而在雷达、医学等领域应用成熟的脉冲压缩技术提供了相应的参考<sup>[3]</sup>。

本文基于正交二相互补序列编码的超声激励原理, 采用单次激励的方式获取正交互补序列的检测结果, 实现单次激励单次解码, 避免高温下传感器位置移动带来的影响且减少检测时间, 提高在线快速检测能力。

## 2、研究内容

脉冲压缩过程分为两种, 以时域法为例, 脉冲压缩的过程如式 (1) 所示。频域法则是求取两者的频谱后相乘再进行快速反傅氏变换获得时域脉压结果  $y(n)$ 。

$$y(n)=s(n) * h(n)=\sum_{i=0}^{N-1} s(i)h(n-i)=\sum_{i=0}^{N-1} h(i)s(n-i)$$

式中,  $s(n)$ 、 $h(n)$  分别为接收信号序列及匹配滤波器脉冲响应序列,  $y(n)$  为匹配滤波器输出序列,  $N$  为采样点数。

在超声检测中, 常用的脉冲压缩处理方法主要包括频率调制脉冲压缩技术和相位调制脉冲压缩技术<sup>[3]</sup>。在频率调制中, 以线性调频信号(chirp 信号)最为典型, 其在整个信号周期内频率随时间呈线性变化; 在相位调制中, 主要以二相编码序列为主, 包含 Barker 码信号、M 序列、Golay 码信号等。其中, Barker 码信号采用单次激励, 最长位数为 13, 即其自相关函数的主旁瓣比值最大为 13, 主副比为 22.3dB。典型二相编码序列-Golay 码信号则采用两次激励, 即分别采用 Golay-A 码、Golay-B 码进行编码激励与解码, 最后将两者激励的结果加合得到最终的结果, 这种方式得到的结果无旁瓣值, 可显著提高多目标分辨能力, 但两次激励的方式需进行多次激励, 可能会存在检测位置变化而影响解码性能。



Fig. 1. EMAT experimental system.

电磁超声检测系统由任意信号发生器 AFG-3021B、信号发生器 Agilent-33220A、功率放大器 RPR-4000、阻抗匹配盒、体波 EMAT 探头及示波器构成, 如图 1 所示。选用的被测铝块试样尺寸为  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ , 任意信号发生器产生不同时宽的相位编码信号, 如 Golay 码、20 位互补码信号等, 经功率放大器后得到大幅值的激励电流, 并经阻抗匹配后作用于 EMAT 产生超声波, 示波器用于接收并观测超声信号。

实验中, 分别采用 16 位互补 Golay 码、20 位互补码信号进行激励, 以 20 位互补码为例, 对应的编码序列分别为  $A=\{+1, -1, -1, +1, -1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, +1, +1\}$ 、 $B=\{+1, -1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, -1, +1, +1, +1, -1, -1\}$ 。以 20 位互补 A 码为例, 当采用该码进行激励时, 信号发生器输出的标准信号  $A(n)$  经电磁超声检测系统后可得到参考信号  $A_r(n)$ 。同时, 构造互补 B 码激励时输出的标准信号  $B(n)$ , 故该 B 码激励时对应的参考信

号  $B_r(n)$  可由如下式表示:

$$B_r(n) = A_r(n) *^{-1} A(n) * B(n)$$

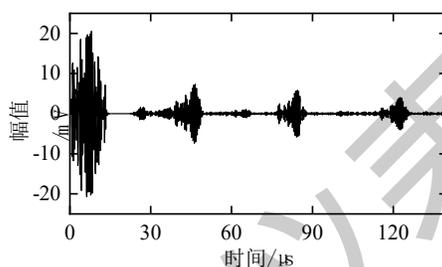
同理, 采用 20 位互补 A 码激励时采集的参考信号  $A_r(n)$  经电磁超声检测系统后得到的 A 扫信号  $a(n)$ , 如图 2-(a) 所示。两者关系式如下式:

$$a(n) = h_d(n) * A_r(n)$$

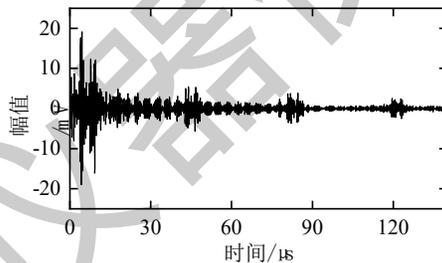
式中,  $h_d(n)$  可视为该电磁超声检测系统的传递函数。由式 4 可知, 可求得采用 B 码激励时的 A 扫信号  $b(n)$ , 如图 2-(b) 所示。

$$b(n) = a(n) *^{-1} A_r(n) * B_r(n)$$

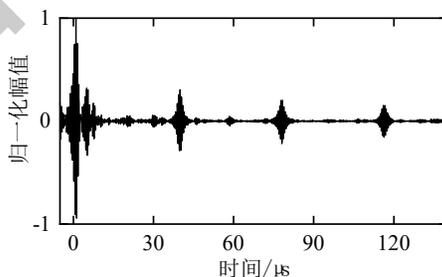
后续脉压过程与单次激励处理过程一致, 分别求取 A 码及 B 码对应的脉压信号  $y_a(n)$  与  $y_b(n)$ 。最后, 将两者加合得到最终的脉压信号  $y(n)$ , 如图 2-(c) 所示。



(a) A 码激励时的 A 扫信号



(b) B 码激励时的 A 扫信号



(c) 加合的脉压信号

Fig. 2. A-scan signal and pulse compression signal during 20 bit complementary A-code excitation

### 3、结论

在超声检测中, 传统的互补序列通常采用两次激励的方式进行编码激励和解码, 本文采用单

码的方式进行编码激励与解码，通过反卷积的方式求取互补码的脉压信号并得到最终结果。实验结果表明，该方式与传统双次激励方式相比可有效避免探头位置移动带来的解码问题并减少检测时间，提高在线快速检测能力。

## 参考文献

- [1] DENG P, HE C, LYU Y, et al. Detection of inner wall circumferential cracks in the special-shaped pipes using surface waves[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(1):14.
- [2] 刘增华, 赵欣, 何存富. 超声导波电磁声传感器的设计与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.  
LIU Z, ZHAO X, HE C. Design and Application of Ultrasonic Guided Wave Electromagnetic Acoustic Transducers[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2022.
- [3] 张慧琳, 宋小军, 他得安. 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, TA D A. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves to long bone detection[J]. *Acta Acustica*, 2014, 39(2): 257-263.