

# 一种基于 WMM 的超声信号噪声抑制新方法

迟大钊, 刚 铁

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 超声衍射时差(time of flight diffraction, TOFD)法存在接收的缺陷衍射信号能量低、易于被噪声干扰的问题。为了解决这一问题, 根据 TOFD 法检测过程中两相邻测点回波中缺陷信号具强相关性、噪声信号具随机性的特点, 在传统小波模极大值(wavelet modular maximum, WMM)方法的基础上, 提出一种改进的噪声抑制技术。分别利用传统和改进的 WMM 方法对计算机仿真信号及焊缝实测信号进行处理。结果表明, 和改进的 WMM 方法相比较, 改进方法对噪声的抑制更为有效, 对不同性质的噪声具有更好的适应性, 能够在很大程度上提高缺陷信号的辨识能力。

**关键词:** 超声衍射时差法; 噪声抑制; 小波模极大值

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)08-0009-04



迟大钊

## 0 序 言

超声 TOFD 法是基于接收缺陷端部的衍射信号实施检测的方法, 和传统的脉冲反射波法相比较, 其接收的衍射波为弱信号。虽然 TOFD 法不以回波信号幅值作为缺陷量化测量的判据, 但是过于微弱的信号幅值将影响缺陷的有效检出。为了便于观测弱衍射信号, TOFD 法检测系统通常要在高增益条件下工作。系统的高增益工作状态会给接收信号带来电噪声干扰; 同时, 焊缝区复杂的各向异性组织也带来噪声干扰。这些噪声成分使缺陷的识别及量化测量变得困难, 因此有必要进行噪声抑制处理<sup>[1]</sup>。

目前, 在噪声抑制研究领域, 基于软件的数字滤波技术迅速发展。虽然各种成熟的噪声抑制方法在处理相关对象时取得了较好的效果, 但同时也存在各自的技术弊端。对于焊缝各向异性组织检测的超声波信号, 现有技术在噪声抑制方面存在很大的提升空间<sup>[2]</sup>。因此, 对焊缝超声波检测信号中噪声成分的抑制一直以来都是无损检测研究人员关注的热点<sup>[3-5]</sup>。为了提高噪声抑制水平, 从而提高对缺陷信号的辨识能力, 文中根据超声成像检测过程中相邻测点获取回波中缺陷信号具有强相关性而噪声信号具有随机性的特点, 在传统 WMM 噪声抑制方

法的基础上, 提出一种改进方法。分别采用传统和改进的 WMM 法对仿真信号及 TOFD 法实测信号进行处理, 通过对比处理效果, 说明改进方法噪声抑制的有效性及其适应性。

## 1 WMM 噪声抑制原理

WMM 噪声抑制原理描述如下。给定一个基本函数, 即

$$\psi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t}{\sqrt{a}}\right) \quad (1)$$

关于文中各公式的说明参见文献[6], 文中不再赘述。  $x(t)$  的小波变换为

$$WT_x(a, t) = x(t) \psi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) db \quad (2)$$

如果  $x(t)$  在  $t_0$  处有一个奇异值, 且  $t$  是  $t_0$  附近的点, 若

$$\frac{\partial WT_x(a, t_0)}{\partial t} = 0 \quad |WT_x(a, t)| < |WT_x(a, t_0)| \quad (3)$$

则  $(a, t)$  是  $WT_x(a, t)$  的模极大值点,  $|WT_x(a, t_0)|$  是相应的模极大值。

设一信号的小波变换  $S_j(t)$  和  $x(t)$  的小波变换在  $(t_{j,n})_{n \in Z}$  处有相同的模极大值, 并且除此之外无其它模极大值, 则  $S_j(t)$  就是  $x(t)$  的重建信号的小波变换。

为了由模极大值重建原信号, Mallat 提出的交

收稿日期: 2011-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005056, 50775054); 国际合作基金资助项目(2007DFR70070); 黑龙江省自然科学基金资助项目(QC2010081)

替投影算法. 令  $V$  是  $L^2(R)$  空间上所有函数的二进小波变换组成的空间  $g_j(t)$ ,  $K$  是序列  $g_j(t)$  所构成的空间, 满足

$$\|g\|_*^2 = \sum_{j \in Z} \left[ \|g_j(t)\|_2^2 + 2^{2j} \left\| \frac{dg_j(t)}{dt} \right\|_2^2 \right] < \infty \quad (4)$$

令  $\Gamma$  是空间  $K$  上的一个闭包, 其中元素  $g_j(t)$  所构成的子集, 满足

$$g_j(t) = WT_x(j, t) \quad j \in Z \quad (5)$$

在空间  $A$  上求出一个元素, 通过在空间  $V$  和  $\Gamma$  上交替投影来实现式 (4) 最小化. 设  $P_V$  和  $P_\Gamma$  分别为向空间  $V$  和  $\Gamma$  的正交投影算子, 则  $P = P_V \cdot P_\Gamma$  是空间  $V$  和  $\Gamma$  的交替投影算子,  $P^n$  是  $P$  的  $n$  次迭代. 对于任一序列  $X = \{g_j(t)\}_{j \in Z} \in K$  有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P^n X = P_A X \quad (6)$$

迭代开始时选取  $g_j(t) = 0$ , 则交替投影收敛于范数最小的元素. 通过交替投影, 实现信号小波系数的重构. 信号的模极大值重构滤波是利用信号在小波各尺度上小波系数的模极大值来重构信号. 信号小波系数模极大值包含了信号的峰变性和奇异性, 可以通过抑制某些极大值点而去除相应的奇异性. 这就是 Mallat 提出的小波模极大值重构滤波及噪声抑制的基本思想<sup>[6]</sup>.

## 2 改进 WMM 噪声抑制原理

传统的 WMM 噪声抑制方法首先将待处理信号进行小波分解, 获取子波序列; 其次寻找细节子波序列中的模极大值点, 获得模极大值序列; 之后利用 ad hoc 算法获取重构的模极大值序列; 最后利用交替投影算法获得重构子波并进行信号重建, 从而获取去噪信号. 当系统的扫描步长足够小时, 超声 TOFD 法检测的相邻 A 扫描数据中的缺陷信号之间具有强互相关性. 理论上讲, 相邻数据序列中的缺陷信号在各自分解的细节子波中也具有一定的相关性. 根据信号相关去噪理论, 在 WMM 噪声抑制方法的基础上, 提出一种基于相邻测点信号模极大值序列互相关的改进噪声抑制算法. 改进的 WMM 去噪算法描述如下.

(1) 首先将待处理信号及相邻测点信号进行离散二进小波变换. 所选尺度应较大, 以使信号的极值点个数占优, 但是若所选尺度太大则会丢失信号的某些重要的局部奇异性. 一般选取  $j = 4, 5$  个尺度, 文中选取  $j = 4$ .

(2) 寻找每级尺度上小波变换系数对应的模极大值点.

(3) 由于噪声的模极大值幅度及密度随尺度的增大以二进制速率降低, 使得最大尺度上的模极大值点主要由信号控制. 对最大尺度上的极大值点设定阈值  $T$ , 去除低于阈值  $T$  的模极大值点.

(4) 将待处理信号及相邻测点信号分解获取的各模极大值序列分别作相关处理, 得到新的模极大值序列.

(5) 对于新模极大值序列不同尺度上每一个极大值点, 利用 ad hoc 算法搜索其对应的极大值线, 并去除尺度不在任一极大值线上的极值点.

(6) 将每一尺度上保留下来的模极大值点重构小波系数, 然后利用重构得到的小波系数重建信号.

## 3 仿真信号处理

在超声 TOFD 检测模式下, 厚度为 20 mm 的铝板中埋藏深度为 10 mm, 直径 2 mm 气孔的计算机仿真信号如图 1 所示. 图 1a 为无噪声干扰条件下的仿真 A 扫描信号, 将其叠加高斯白噪声获得噪声背景下的仿真 A 扫描信号, 信噪比为 -20 dB, 如图 1b 所示. 在扫描步长为 0.2 mm 的参数条件下, 获取的相邻测点信号及加噪信号分别如图 1c, d 所示. 图 1b 所示信号作为待处理的仿真信号.

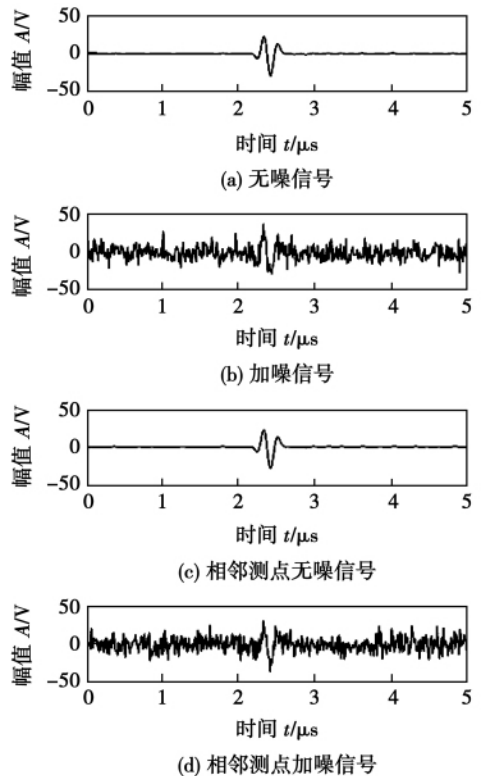


图 1 仿真信号

Fig. 1 Simulation signals

选取 *sym8* 母小波, 分解层次为 4 阶的条件下, 分别采用传统及改进的 WMM 方法对图 1b 所示的待处理信号进行去噪处理. 传统方法分解获取的模极大值序列见图 2. 噪声极大值点在第 1-2 阶序列中呈遍历性分布, 随着分解阶数的增加, 噪声模极大值点逐渐减少, 但在各级模极大值序列中仍然保留了大量的噪声极大值点. 在第 4 阶序列中, 虽然缺陷信号所对应的模极大值占优, 但噪声极大值点仍然具有较高的能量水平.

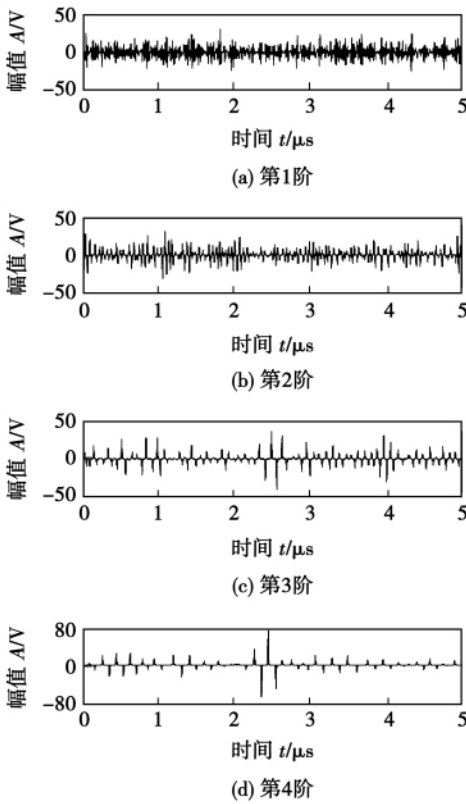


图 2 传统算法分解极大值序列

Fig. 2 Maximum modulus sequences decomposed by conventional algorithm

改进的 WMM 方法获取的模极大值序列见图 3. 在分解的第 1-2 阶序列中, 虽然噪声模极大值仍然占优, 但与传统方法获得的相应序列相比较, 噪声分量就得到了一定程度的控制, 序列中仅保留了部分噪声极大值点. 随着分解阶数的增加, 噪声模极大值点很大程度上被抑制. 在第 3 阶序列中, 仅保留了少量的噪声极大值点. 在第 4 阶序列中, 噪声极大值点被有效地抑制, 仅保留了缺陷信号对应的模极大值点.

待处理信号经传统及改进方法的噪声抑制结果见图 4. 传统方法在噪声抑制方面具有一定的效果, 离散白噪声得到了较好抑制, 缺陷信号也获得一定

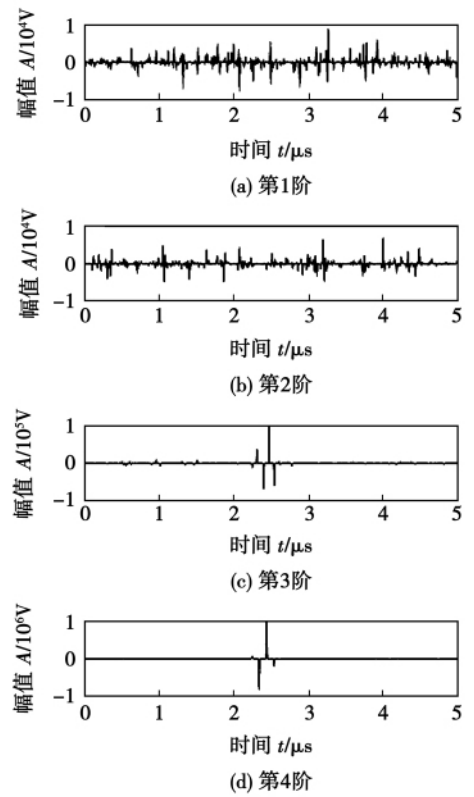


图 3 改进算法分解极大值序列

Fig. 3 Maximum modulus sequences decomposed by improved algorithm

程度的辨识. 但在相位特征上存在较严重的失真, 其与仿真信号之间的相关性较差. 图 1a 所示的无噪声干扰条件下气孔仿真信号呈负相位特征, 而经传统方法处理后的信号呈正相位特征, 如图 4a 所示. 相位特征信息的失真将带来信号到达时刻读取的偏差, 从而影响缺陷的定性识别及降低缺陷量化测量精度. 和传统方法处理结果相比较, 改进方法获得的气孔缺陷信号虽然在波形上存在一定的冗

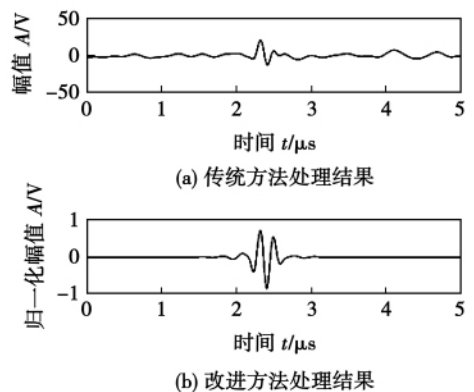


图 4 仿真信号处理结果

Fig. 4 Processing results for simulation signals

余震荡失真,但负相位特征更为明显,且具有更高的信噪比,如图4b所示。可见,改进方法在噪声抑制及缺陷信号复原等方面优于传统方法。

#### 4 实际焊缝检测信号处理

利用超声 TOFD 法对 20 mm 厚高强铝合金 MIG 焊缝进行检测。对检测回波信号进行噪声抑制处理,并结合破坏性试验对信号处理结果进行分析。检测所选用的超声波探头为标称中心频率 5 MHz,晶片尺寸直径 6 mm,折射角  $60^\circ$ ,两探头间距  $2S = 48$  mm,系统增益 62 dB。获取的典型回波信号及相应处理结果如图 5 所示。在图 5a 中所示检测获取的原始信号中包含有作为时间基准的侧向波、缺陷波以及不同频率成分的噪声信号。其中低频的噪声信号和缺陷信号发生混叠,影响了缺陷的有效识别。传统方法对于不同成分的噪声具有一定的抑制效果,但仍然保留了部分低频噪声成分,其将带来缺陷的误判;同时,在噪声背景下恢复得到缺陷信号波形存在畸变,如图 5b 所示。改进的 WMM 方法对成分复杂的噪声信号具有很好的适应性,并能够有效提取出缺陷信号,从而为量化测量提供可靠的依据,如图 5c 所示。

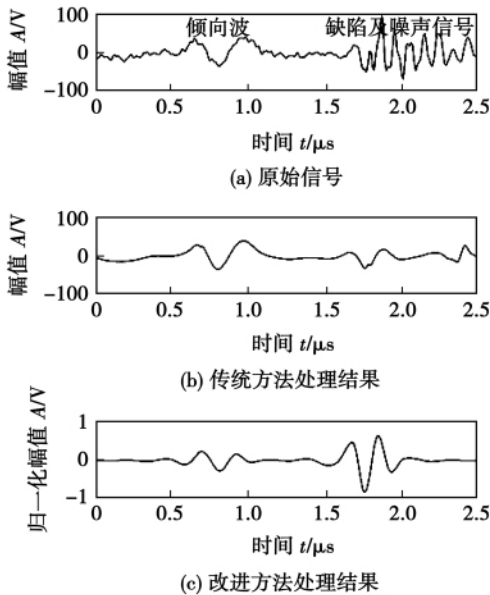


图 5 实际焊缝检测信号处理结果

Fig. 5 Processing results for weld tested signals

#### 5 结 论

(1) 在传统 WMM 噪声抑制方法的基础上,根据相邻测点回波中缺陷信号间具强相关性的特点提出了改进方法,改进方法能更为有效地抑制小波模极大值序列中的噪声模极大值点。

(2) 改进的 WMM 方法对噪声信号的抑制更为有效,对不同噪声成分更具适应性。恢复的缺陷信号在到达时刻及相位等方面具有较好的保真度,为缺陷识别及量化检测提供可靠技术支持。

(3) 改进的 WMM 方法仍然继承了传统方法存在的部分技术弊端,如计算过程相对复杂,恢复的信号在波形上存在一定程度的冗余震荡失真等。上述技术问题有待进一步研究改进。

#### 参考文献:

- [1] 迟大钊,刚铁,姚英学,等. 基于超声波法的紫铜焊接结构缺陷检测[J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 21-24.  
Chi Dazhao, Gang Tie, Yao Yingxue, et al. Defect detection for red copper weldment using ultrasonic method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(5): 21-24.
- [2] 迟大钊. 基于超声 TOFD 法的焊缝缺陷表征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] Bettayeb F, Haciane S, Aoudia S. Improving the time resolution and signal noise ratio of ultrasonic testing of welds by the wavelet packet[J]. NDT and E International, 2005, 38(6): 478-484.
- [4] 焦标强,史耀武,史立丰,等. 基于小波包分析的铜/钢异种材料摩擦焊接头质量的超声无损评价[J]. 无损检测, 2005, 27(8): 412-415.  
Jiao Biaoqiang, Shi Yaowu, Shi Lifeng, et al. Ultrasonic nondestructive evaluation for the quality of copper-steel friction-welded joint based on wavelet packet analysis[J]. Nondestructive testing, 2005, 27(8): 412-415.
- [5] Al-Ataby A, Al-Nuaimy W, Brett C R, et al. Automatic detection and classification of weld flaws in TOFD data using wavelet transform and support vector machines[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2010, 52(11): 597-602.
- [6] 胡广书. 现代信号处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

作者简介: 迟大钊,男,1976 年出生,博士,讲师。主要从事焊接质量检测与评价方面的科研和教学工作,发表论文 20 余篇。Email: dzchi@hit.edu.cn

## MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

**Friction welding process with thermomechanical heat treatment for oil drill pipe** ZHOU Jun<sup>1</sup> , QIN Guoliang<sup>2</sup> , QI Xubin<sup>1</sup> ( 1. Harbin Welding Institute , Harbin 150080 , China; 2. Institute of Advanced Welding Technology , Shandong University , Jinan 250061 , China) . p 1 – 4

**Abstract:** By the thermomechanical heat treatment friction-welding machine , the pipe body of 37CrMnMo steel and the pipe joint of 42CrMoA steel were welded , and the mechanical properties and microstructures of the joint were tested and analyzed. The experimental results show that the grain size in the full quenching zone can reach 8 grade , the partial quenching zone is narrow and covered by thermomechanical zone. After tempering treatment , the microstructure in partial quenching zone is the mixed microstructure of tempered sorbite and ferrite or the tempered sorbite with the grown carbide. The hardness in heat-affected zones at pipe body and joint decreases by 6. 9% and 4. 2% respectively. The yield ratio of the joint is up to 0. 905 , its average impact energy is 95 J , and the fracture in tensile test appears at 37CrMnMo steel side. The mechanical properties of the joint meet the national standard of SY/T5561 – 1999 and America Petroleum Institute standard of APISPEC5D. The studied results indicate that the thermomechanical heat treatment can avoid the great reduction of impact toughness of weld and the decrease of hardness at the boundary of HAZ.

**Key words:** friction welding; oil drill pipe; thermomechanical heat treatment; microstructure and mechanical properties

**Effects of welding heat input on structure and properties of 800 MPa ultra fine grained steel welding joints** ZHAO Hongyun<sup>1</sup> , LIU Jiakun<sup>1</sup> , LUO Zong'an<sup>2</sup> , HU Haifeng<sup>1</sup> , WANG Guodong<sup>2</sup> ( 1. School of Materials Science and Engineering , Harbin Institute of Technology at Weihai , Weihai 264209 , China; 2. State Key Laboratory of Rolling and Automation , Northeastern University , Shenyang 110004 , China) . p 5 – 8

**Abstract:** The HAZ microstructure and mechanical properties of the 800 MPa grade ultra fine grained steel under different welding heat input were studied. The results showed that HAZ grain of the 800 MPa grade ultra fine grained steel had grown up distinctly under welding thermal cycle , and there was a more obvious growth trend along with the increase of welding heat input. HAZ contained ultra-low carbon bainite and thin ferrite , and the structure of overheated zone changed obvious under the effect of welding heat , which was the birthplace of the fracture cracks. By comparing to that of the base metal , the hardness value of the whole HAZ was decreased , and there were two distinct softened regions under different welding heat input. The yield strength of the welded joints was reduced gradually with the increase of welding heat input.

**Key words:** ultra fine grained steel; low carbon bainite;

softened region

**A novel WMM method based de-noising for ultrasonic signal** CHI Dazhao , GANG Tie ( State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . p 9 – 12

**Abstract:** Ultrasonic TOFD ( time of flight diffraction) has the shortcoming of sensitive to noise for the lower amplitude in the tested signal. According to the characteristics that the defect waves have strong correlation and the noise non-correlation in TOFD tested two adjacent A-scan lines , an improved WMM ( wavelet modular maximum) method based de-noising is proposed. Computer simulated and weld tested signals are de-noising processed by using conventional and improved WMM methods correspondingly. The experimental results show that the improved method is more effective in noise suppression and has better adaptability for different noise. Compared with the conventional method , the proposed technique can greatly improve the ability of identifying defect wave.

**Key words:** ultrasonic TOFD; de-noising; wavelet modular maximum

**PFC control strategy of variable polarity TIG welding power supply** DING Kun , YAO Heqing ( College of Mechanical & Electrical Engineering , Hohai University , Changzhou 213022 , China) . p 13 – 16

**Abstract:** The output power of variable polarity TIG welding power supply was studied. The results show the output power changes with the period and duty ratio of variable polarity welding , and the output power in electrode positive is far large than that in electrode negative. The periodically changing output power will cause the variable polarity TIG welding power supply to absorb power from power grid periodically. The input current of the power supply was distorted seriously by using normal PFC ( power factor correction) circuit and control strategy. A new PFC control strategy based on load observer is presented to reduce the harmonics of variable polarity inverter arc welding power supply. Experiments result shows that this control strategy is available and near unity power factor is obtained.

**Key words:** variable polarity; power factor correction; periodic load; load observer

**Microstructure and properties of aluminum alloy welded by electric current supported laser welding** ZHANG Xinge , LEI Zhenglong , GUO Xinjian , CHEN Yanbin ( State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . p 17 – 20

**Abstract:** The 2219 aluminum alloy with 3 mm thickness was carried out by electric current supported laser welding , and the influences of electric current on the macrostructure , micro-