

DOI:10.11784/tdxbz202411026

## 基于 TTAO-VMD 和四次回波的管道残余厚度检测

王超<sup>1</sup>, 邢一皇<sup>1</sup>, 郭琪<sup>2</sup>, 王璇<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

2. 天津市特种设备监督检验技术研究院国家市场监管重点实验室(特种设备数字孪生共性技术), 天津 300192)

**摘要:** 在管道残余厚度检测过程中, 存在噪声和遇小缺陷信号发生畸变的问题, 导致检测结果不准确. 基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)法的电磁超声信号降噪为了避免过分解或欠分解, 需对其关键参数分解模态数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  进行寻优. 本文首次将三角拓扑聚合优化(triangulation topology aggregation optimizer, TTAO)方法与变分模态分解法结合, 通过 TTAO 算法对 VMD 算法中的最佳参数组合进行寻优, 实现了两参数同步优化, 再将最佳参数组合代入 VMD 算法进行分解, 计算相关系数来选取合适的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)进行重构, 得到处理后的信号. 当管道内壁存在小缺陷时, 会产生缺陷和底部两种回波. 针对常规脉冲回波反射法对内壁出现尺寸小于换能线圈面积缺陷时回波信号发生畸变引起的残余厚度测量误差大的问题, 提出了基于 4 次回波的管道残余厚度检测法, 该方法通过对比一次、三次回波波包峰值时间间隔和二次、四次回波波包峰值时间间隔判断小缺陷的存在, 进而区分缺陷回波与底部回波, 并利用两段时间间隔差值计算出管道内壁缺陷深度, 进而得出管道残余厚度值. 通过实验对比脉冲反射法和基于 TTAO-VMD 和 4 次回波的管道残余厚度检测方法, 结果表明无论是否存在小缺陷, 本文提出的方法均可精确测量残余厚度, 平均相对误差为 0.28%.

**关键词:** 无损检测; 电磁超声; 变分模态分解; 残余厚度

中图分类号: TB553; TH89

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)07-0674-09

## Pipeline Residual Thickness Detection Based on TTAO-VMD and Quad Echoes

Wang Chao<sup>1</sup>, Xing Yihuang<sup>1</sup>, Guo Qi<sup>2</sup>, Wang Xuan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Digital Twin Generic Technology in Special Equipment for State Market Regulation, Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** When detecting the residual thickness of a pipeline, the presence of noise and distortion of small defect signals can lead to detection errors. To avoid over-decomposition or under-decomposition in the variational mode decomposition (VMD) of electromagnetic ultrasonic signals, it is necessary to optimize the key parameters: the number of decomposition modes  $K$  and the penalty factor  $\alpha$ . This paper combines the triangulation topology aggregation optimizer (TTAO) with the VMD algorithm for the first time. TTAO is used to optimize the best parameter combination for the VMD algorithm, achieving the synchronous optimization of the two parameters; the best parameter combination is then fed into the VMD algorithm for decomposition. The correlation coefficients are calculated to select the appropriate number of intrinsic mode functions (IMFs) for reconstruction, yielding the processed signal. When there are small defects on the inner wall of the pipeline, two types of echoes, defect echoes and bottom echoes, are generated. Aimed at the problem of large measurement errors for residual wall thickness due to signal distortion when using the conventional pulse echo reflection method for the defects whose sizes are smaller than the transducer coil area, a

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2024-12-20.

作者简介: 王超 (1973—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 王超, wangchao@tju.edu.cn.

基金项目: 天津市重点研发计划资助项目 (23YFZCSN00080).

Supported by the Key Research and Development Program of Tianjin, China (No. 23YFZCSN00080).

pipeline residual wall thickness detection method based on quad echoes is proposed. This method judges the existence of small defects by comparing the time intervals between the peaks of the primary and tertiary echo wave packets and those of the secondary and quaternary echo wave packets, thereby distinguishing between defect echoes and bottom echoes. The depth of the inner wall defect of the pipeline is calculated using the difference between the two time intervals, and thus the residual wall thickness of the pipeline is obtained. Experiments were conducted to compare the pulse reflection method with the proposed pipeline residual thickness detection based on TTAO-VMD and quad echoes. The results show that the proposed method can accurately measure residual wall thickness, whether there are small defects or not, with an average relative error of 0.28%.

**Keywords:** non-destructive testing; electromagnetic acoustic; variational mode decomposition (VMD); residual thickness

在国民经济架构中,管道运输占据着举足轻重的地位.管道在长期的运行过程中,不可避免地会受到各种形式的磨蚀,导致管道结构损伤.一旦管道出现严重缺陷,便会引发重大安全事故.因此,对管道残余厚度进行及时检测,对预防管道泄漏事故至关重要<sup>[1]</sup>.

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 检测技术利用电磁耦合方法激励和接收超声波,无需耦合剂,可适用高温压力管道的检测<sup>[2-3]</sup>,其应用于管壁残余厚度检测一般采用脉冲反射法<sup>[4-5]</sup>.脉冲反射的回波信号微弱,易受噪声干扰,导致提取回波信号中所包含的时间信息困难,限制了测厚精度的提升<sup>[6]</sup>.小波变换<sup>[7]</sup>和经验模态分解法<sup>[8]</sup>是电磁超声信号降噪主要方法. Dragomiretskiy 等<sup>[9]</sup>提出了变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 法,该方法避免了小波变换中小波基及小波层数选取的复杂性和经验模态分解法的模态混叠和端点效应问题,很快在电磁超声信号降噪处理中获得成功的应用<sup>[10]</sup>.对于 VMD 算法,分解模态数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  是影响分解效果的重要参数,若选取不当,会造成过分解或欠分解.张勇等<sup>[11]</sup>通过经验设定  $\alpha$  值,以重构信号信噪比最高来确定  $K$  值,该寻优方法仅针对  $K$  值进行寻优,寻优过程复杂耗时,且无法同步获取两参数最优组合.

管道内壁遭受腐蚀后,形态复杂,也容易导致残余厚度检测不准确.当管道内壁存在小于换能面积的缺陷时,会产生缺陷与底部两类回波<sup>[12]</sup>,误判会给电磁超声残余厚度检测引入较大的误差.

Zhao 等<sup>[13]</sup>在 2024 年提出了三角拓扑聚合优化 (triangulation topology aggregation optimizer, TTAO) 算法,该算法在寻优准确性和快速性等方面表现出色.本文首次将 TTAO 方法用于基于 VMD 电磁超声信号降噪处理的参数寻优,可同步得出两参数最优组合;针对常规脉冲反射法对内壁出现尺寸小于换能

线圈面积缺陷时残余厚度测量误差大的问题,提出了基于四次回波的管道残余厚度检测法,自动区分缺陷回波与底部回波,实现了小缺陷深度的测量.

## 1 电磁超声横波检测理论

### 1.1 电磁超声原理

电磁超声换能器主要由永磁体和线圈组成,其基本原理如图 1 所示.永磁体提供外部偏置磁场,在激励线圈内通入高频电流,其周围会产生变化的磁场,被测金属试件处在交变磁场中,在趋肤层内会产生大小相等、方向相反的感应涡流,感应涡流在永磁体产生的静态偏置磁场和线圈附近产生的交变磁场的双重影响下,使得被测金属试件表面的晶体粒子受到洛伦兹力而带动相邻质点振动形成超声波波源,从而在金属试件内部产生不同类型的超声波<sup>[14]</sup>,其中,超声横波的运动方向与被测金属试件表面垂直.对于非铁磁性材料,电磁超声横波主要是由洛伦兹力产生,磁致伸缩力和磁性力可忽略不计<sup>[15-17]</sup>.

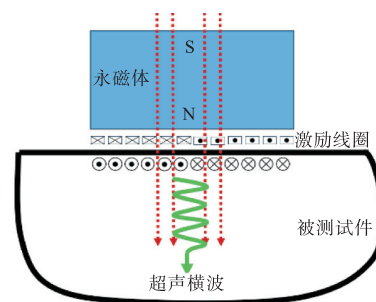


图 1 电磁超声换能器原理

Fig.1 Schematic of electromagnetic acoustic transducer

电磁超声的检测过程涉及多物理场耦合<sup>[18-19]</sup>.根据电磁学原理

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

式中:  $\nabla$  为哈密顿算子;  $\mathbf{H}_d$  为交变磁场;  $\mathbf{J}_c$  为激励电流密度.

$$B_d = \mu H_d \quad (2)$$

式中:  $B_d$  为交变磁场的磁感应强度;  $\mu$  为被测试件的相对磁导率. 永磁体提供静态偏置磁场, 过程中无电流产生. 永磁体在检测试件上提供的偏置磁场大小为

$$B_s = \mu H + B_r \quad (3)$$

式中  $B_r$  为永磁体的剩余磁感应强度. 被测试件中的磁感应强度  $B$  是由交变磁场  $B_d$  与外部提供的静态偏置磁场  $B_s$  叠加而成, 其表达式为

$$B = B_s + B_d \quad (4)$$

根据电磁感应定律, 交变磁场会产生电场, 从而在表面趋肤层形成涡流

$$\nabla \times E_e = -\frac{\partial B_d}{\partial t} \quad (5)$$

$$J_e = \gamma E_e \quad (6)$$

式中:  $E_e$  为交变磁场产生的感应电场;  $J_e$  为感应涡流密度;  $\gamma$  为被测试件的电导率. 被测试件表面趋肤层的涡流受到静态偏置磁场和交变磁场的作用产生洛伦兹力, 即

$$f_L = J_e \times B = J_e \times (B_s + B_d) \quad (7)$$

电磁超声接收过程是发射过程的逆过程<sup>[20-21]</sup>, 超声波在传播过程中遇到声阻抗不同的地方会发生反射, 当超声波经过反射再次回到被测试件表面时, 试件中带电粒子的运动在外部静态偏置磁场的作用下激发涡流, 涡流密度为

$$J'_e = \gamma(v \times B_s) \quad (8)$$

式中  $v$  为和静态偏置磁场  $B_s$  相互作用的粒子速度.

### 1.2 脉冲回波反射法

当管道内壁被大面积磨损, 其缺陷尺寸大于换能面积, 可采用脉冲回波反射法测量管壁残余厚度, 如图 2 所示. 横波在管壁中不断反射, 形成波包峰值所对应的时间差值相等的回波信号. 通过每两个相邻回波包峰值所对应的时间差值平均值可计算被测位置残余厚度为

$$h = v_m \frac{\Delta t}{2} \quad (9)$$

式中  $v_m$  为横波在介质中的波速.

超声波在不同介质内传播速度不同, 在计算厚度前需要了解在该介质中的传播速度. 传播速度与被测试件的弹性模量、密度和泊松比有关. 超声横波在介质内的传播速度为

$$v_m = \sqrt{\frac{E'}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma')}} \quad (10)$$

式中:  $E'$  为弹性模量;  $\rho$  为试件密度;  $\sigma'$  为泊松比,

根据被测材料的不同计算对应的横波波速.

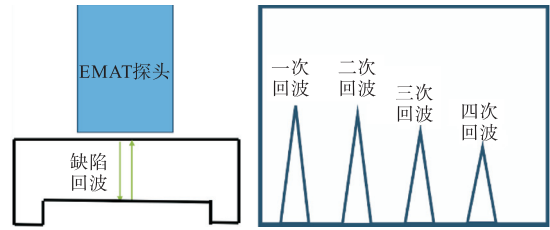


图 2 脉冲回波反射法测量残余厚度

Fig.2 Measurement of the residual thickness by pulse echo reflection method

## 2 基于 TTAO 优化 VMD 的噪声抑制方法

### 2.1 参数寻优

VMD 算法是通过自适应准正交变换将原始信号分解为  $K$  个本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量, 每个模态分量之间不会出现模态分量混叠或端点效应. 对数据 VMD 分解时需要预设分解模态数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$ .  $K$  和  $\alpha$  会影响 VMD 算法的分解效果,  $K$  值过大导致过分解, 产生虚假分量, 过小导致欠分解, 有效频率未被分解出来;  $\alpha$  选择不当也会导致过分解和欠分解, 且两参数值是无规律的, 组合会相互影响, 为了节约时间找到最优  $K$  值和  $\alpha$  值, 本文通过 TTAO 对 VMD 算法中的参数进行寻优的方法来抑制噪声.

TTAO 灵感来自于相似三角形, 随着迭代, 新的顶点在搜索空间中不断生成, 并用于构成不同大小的相似三角形. 在所提出的 TTAO 算法中, 每个三角形被视为具有 4 个主体的基本进化单元, 即三角形的 3 个顶点和 1 个内部随机顶点. 更重要的是, 聚合的核心是对具有优越特性的顶点进行分组. 具体而言, TTAO 算法采用聚合来收集不同拓扑单元之间或内部具有良好信息的顶点. 需要注意的是, 构造的三角形都是等边三角形, 并从第二定理导出构造相似三角形.

本文利用 TTAO 算法对 VMD 的两个参数进行优化, 将包络熵作为优化指标, 信号包络熵定义为

$$p_i = \frac{a(t)}{\sum_{t=1}^N a(t)} \quad (11)$$

$$E_p = -\sum_{t=1}^N p_i \lg p_i \quad (12)$$

式中:  $a(t)$  为信号使用希尔伯特变换求出的包络函数;  $p_i$  为  $a(t)$  归一化后的结果;  $E_p$  为包络熵;  $N$  为函数离散化的点数. 包络熵是一种分析信号有序程度和

反映信号中随机分量数量的指标,若 IMF 分量中含噪多,随机分量越多,包络熵就越大;反之 IMF 分量中含有较多有效信号,呈现规律特性,包络熵就越小.因此,本文将 VMD 分解后的局部极小包络熵值(分量中的最小包络熵值)作为寻优过程的适应度值.

基于 TTAO 优化 VMD 的噪声抑制过程如下.

(1) 种群初始化,设定优化算法的参数,包括种群规模和迭代次数,  $K$  值和  $\alpha$  值的上、下边界.

(2) 三角形拓扑单元形成,每组三角形拓扑单元在内部聚合第 4 个顶点.

(3) 根据适应度值对每组三角形拓扑单元中每个顶点的位置进行排序.排第 1 为最优个体,排第 2 为次优个体.

(4) 更新位置,计算新的适应度值,排出最优和次优个体(使用次优个体防止最优个体陷入局部极值).

(5) 当达到迭代次数后,根据适应度值选择最优种群位置.

## 2.2 信号重构

输出最优  $K$  和  $\alpha$  组合后,对数据进行 VMD 分解,获得  $K$  个 IMF 分量,计算每个 IMF 分量与原始信号的相关系数,计算公式为

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{M}}{\sqrt{\left(\sum X^2 - \frac{\sum X^2}{M}\right)\left(\sum Y^2 - \frac{\sum Y^2}{M}\right)}} \quad (13)$$

式中:  $X$ 、 $Y$  是求相关性的两个变量;  $M$  为变量取值的个数.统计学中一般认为,当  $0 \leq |r| < 0.4$  时,两个变量低度相关;当  $0.4 \leq |r| < 0.7$  时,两个变量中度相关;当  $0.7 \leq |r| \leq 1.0$  时,两个变量高度相关.将高度相关的 IMF 分量相加重构信号,即可得到降噪后的信号.

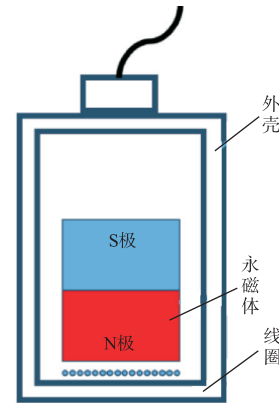
## 3 电磁超声回波实验信号降噪处理

电磁超声换能器如图 3 所示,结构由圆柱形永磁体和螺旋线圈组成,圆柱形永磁体底面直径 15 mm,高 20 mm,线圈线径 0.2 mm,线圈导线间距 0.2 mm,封装在底面直径 25 mm、高 40 mm 的外壳内.

电磁超声检测系统如图 4 所示,电磁超声实验仪(中特检仪器有限公司,型号 AWEMAI-UG)和计算机构成电磁超声检测系统(图 4(a)),电磁超声检测系统内包含多种工作模块(图 4(b)).激励采用 2 MHz 脉冲,幅值为 1 V,系统采样频率为 50 MHz.



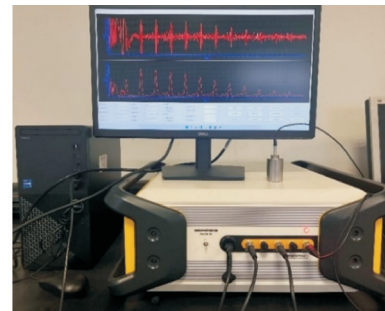
(a) 电磁超声换能器实物



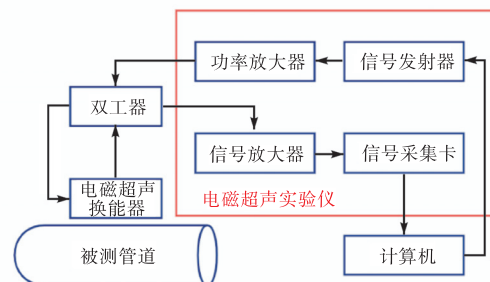
(b) 电磁超声换能器结构

图 3 电磁超声换能器

Fig.3 Electromagnetic acoustic transducer



(a) 实验系统实物

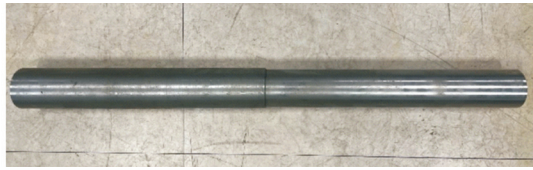


(b) 实验系统结构

图 4 电磁超声检测系统

Fig.4 Electromagnetic acoustic inspection system

选择内径 70 mm、外径 50 mm 管道(图 5(a)),管壁厚度为 10 mm,管道内部加工人工缺陷直径为 16 mm,缺陷深度为 2.0 mm(图 5(b)),残余厚度 8 mm.



(a) 被测管道



(b) 缺陷放大

图 5 被测管道与内壁缺陷放大

Fig.5 Tested pipeline and the magnified view of the inner wall defects

探头置于管道外侧,正对缺陷,得到原始检测信号如图 6 所示.此时特征值提取困难,数据无法读取,需对信号进行降噪处理.

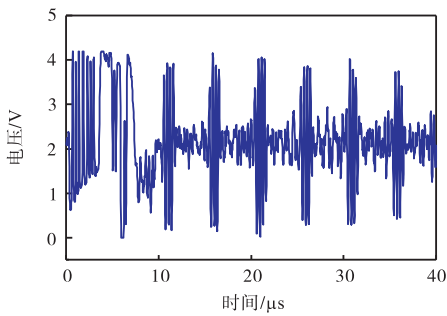


图 6 电磁超声原始信号

Fig.6 Electromagnetic acoustic original signal

前 10  $\mu\text{s}$  为主脉冲部分,为无效信息,去掉该部分,利用本文提出的 TTAO 优化 VMD 算法对原始信号进行降噪处理,其中迭代次数设为 100 次,种群规模为 30,  $K$  值范围为 1 ~ 10,  $\alpha$  值范围为 1000 ~ 3000,得到迭代收敛曲线如图 7 所示.

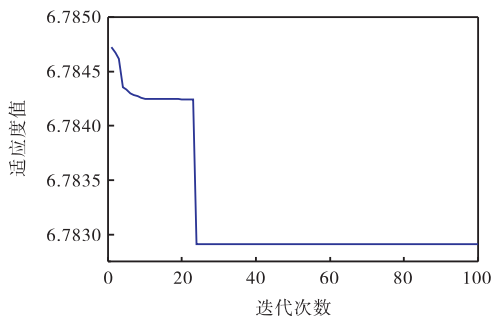
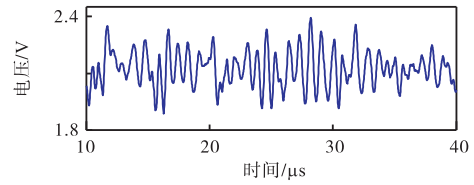


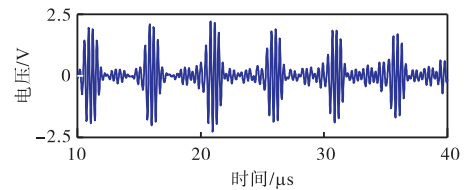
图 7 迭代曲线

Fig.7 Iteration curve

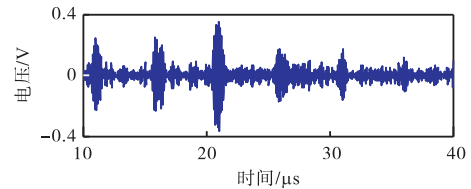
经过多次迭代后,得到最优  $K$  值和  $\alpha$  值组合为 (3, 1846),进行 VMD 分解,分解后得到的各个 IMF 分量如图 8 所示.



(a) IMF1



(b) IMF2

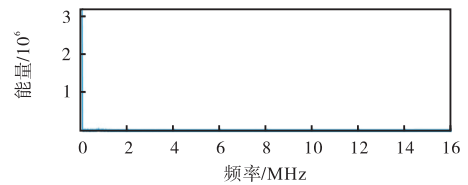


(c) IMF3

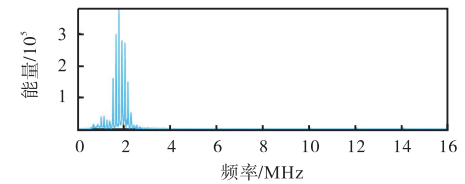
图 8 各个 IMF 分量时域图

Fig.8 Time-domain plots of each IMF component

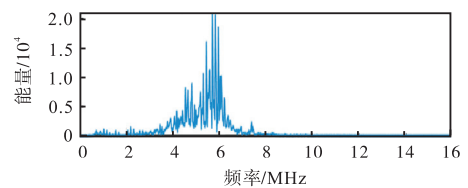
各个 IMF 分量频谱图如图 9 所示,可知各个



(a) IMF1 频谱图



(b) IMF2 频谱图



(c) IMF3 频谱图

图 9 各个 IMF 分量频谱图

Fig.9 Spectrogram of each IMF component

IMF 之间不存在频率重复或中心频率过近, 同一个 IMF 也不存在多个不同中心频率的信号, 因此不存在过分解或欠分解.

计算各个 IMF 分量与原始信号的相关系数, 如表 1 所示.

表 1 各个 IMF 分量与原始信号的相关系数

Tab.1 The correlation coefficients between each IMF component and the original signal

模态分量	相关系数
IMF1	0.337 5
IMF2	0.978 9
IMF3	0.316 4

根据表 1 可知 IMF2 与原始信号高度相关, 因此取 IMF2 信号作为重构信号.

分别测量管道无损状态下(残余厚度 10 mm), 缺陷深度为 2 mm、直径 16 mm(残余厚度 8 mm)和缺陷深度为 2 mm、直径 4 mm(残余厚度 8 mm)时的结果曲线, 对 3 组数据进行 TTAO-VMD 算法处理, 并提取与原信号高度相关分量重构, 利用脉冲反射法测量厚度值, 结果如表 2 所示.

表 2 实验结果

Tab.2 Experimental results

残余厚度/ mm	最优值		各分量相关系数			实测厚度/ mm
	K	$\alpha$	IMF1	IMF2	IMF3	
10(无缺陷)	3	1 900	0.331 5	0.981 6	0.332 1	9.98
8(缺陷直径 16 mm)	3	1 846	0.337 5	0.978 9	0.314 6	8.01
8(缺陷直径 4 mm)	3	1 840	0.348 9	0.986 2	0.287 5	4.52

经过数据处理后, 无缺陷和缺陷尺寸大于换能面积时残余厚度测量相对误差分别为 -0.200% 和 0.125%. 然而当缺陷尺寸小于换能面积时, 相对误差达到了 -43.5%.

#### 4 基于四次回波的管道残余厚度检测

当缺陷尺寸小于换能面积时, 回波信号发生畸变, 此时先到达缺陷的横波一部分产生反射, 形成缺陷回波, 另一部分到达管道内壁, 再次反射, 形成底部回波, 如图 10 所示. 此时, 相邻回波波包峰值之间的时间差不再相等, 直接采用脉冲反射法会导致测量的管壁残余厚度产生误差.

由图 10 可知, 一次回波和三次回波是由小缺陷造成的, 为缺陷回波; 二次回波和四次回波是内壁反射的, 为底部回波.

定义检测到的一次回波波包峰值与三次回波波包峰值对应的的时间间隔为  $\Delta t_1$ , 二次回波波包峰值与

四次回波波包峰值对应的的时间间隔  $\Delta t_2$ .

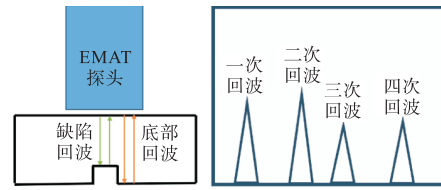


图 10 小缺陷时的横波传递过程

Fig.10 Transverse wave propagation process at small defects

当  $\Delta t_1 = \Delta t_2$  时, 检测位置内壁缺陷尺寸大于换能面积时, 此时  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ , 残余厚度  $h$  可表示为

$$h = \frac{\Delta t_1}{4} v_m \tag{14}$$

当  $\Delta t_1 \neq \Delta t_2$  时, 存在小于换能面积的小缺陷. 当被测管壁较薄或小缺陷深度较深时, 一次的缺陷回波返回过快, 与激励脉冲重叠, 导致一次回波波包峰值不能提取, 从而产生将二次回波误判为一次回波的问题.

可通过比较两个时间间隔实现底部回波和缺陷回波的区分: 当  $\Delta t_1 > \Delta t_2$  时, 提取的该段回波信号内一次回波与三次回波为底部回波, 二次回波与四次回波为缺陷回波; 当  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  时, 提取的该段回波信号内一次回波与三次回波为缺陷回波, 二次回波与四次回波为底部回波, 此时缺陷深度  $\Delta h$  可表示为

$$\Delta h = \begin{cases} \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2} v_m & \Delta t_1 > \Delta t_2 \\ \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2} v_m & \Delta t_1 < \Delta t_2 \end{cases} \tag{15}$$

通过缺陷深度可以反推当前的残余厚度值为

$$h = H - \Delta h \tag{16}$$

式中  $H$  为原有管道厚度值.

基于 4 次回波的管道残余厚度检测方法流程如图 11 所示.

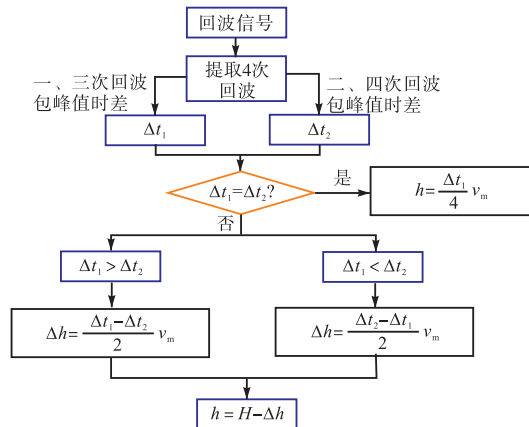


图 11 基于 4 次回波的管道残余厚度检测方法流程

Fig.11 Flow chart of the pipeline residual thickness detection method based on quad echoes

### 5 管道残余厚度检测实验

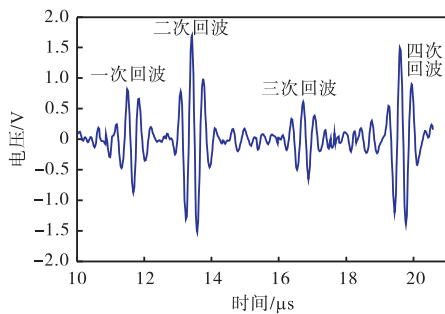
继续在被测管道内壁加工人工缺陷,小于换能面积的人工缺陷直径为 4 mm,缺陷深度分别为 1.5 mm 和 2.0 mm,大于换能面积的人工缺陷直径为 16 mm,缺陷深度为 2.0 mm,加工后的内壁缺陷放大如图 12 所示.将探头置于管道存在缺陷的位置,采集 3 类缺陷的原始检测信号.



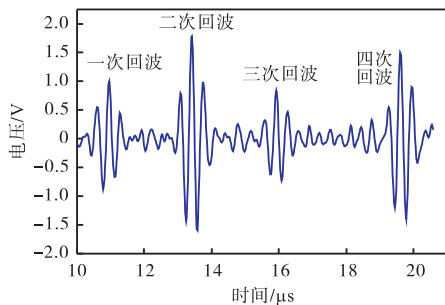
图 12 内壁缺陷放大

Fig.12 Magnified view of the inner wall defects

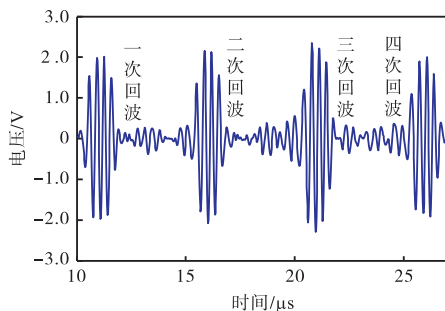
对原始检测信号进行 TTAO-VMD 降噪处理,处理后的结果如图 13 所示.当缺陷尺寸小于换能面积



(a) 缺陷深度 1.5 mm, 直径 4 mm



(b) 缺陷深度 2.0 mm, 直径 4 mm



(c) 缺陷深度 2.0 mm, 直径 16 mm

图 13 实验结果

Fig.13 Experimental results

(图 13(a)、(b))时,  $\Delta t_1 < \Delta t_2$ ,可判定存在小尺寸缺陷,且二次回波与四次回波为底部回波,一次回波与三次回波为缺陷回波.

当缺陷尺寸大于换能面积(图 13(c))时,  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ,可判定不存在小尺寸缺陷,由于实际检测有误差,很难实现两者相等,因此设定一个阈值,当  $\frac{|\Delta t_1 - \Delta t_2|}{\Delta t_1} < 0.5\%$  时,令  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ .

提取 3 组回波波包峰值对应的时间,分别采用脉冲反射法和基于 4 次回波的管道残余厚度检测法计算残余厚度,两种方法对比如表 3 所示.脉冲回波反射法通过相邻回波波包峰值的时间差值平均值计算残余厚度,当缺陷尺寸大于换能面积时,该方法精度较高,检测结果准确.当缺陷尺寸小于换能面积时,由于回波发生了畸变,计算时受到两种回波的干扰,无法得到准确残余厚度值,计算误差很大.基于 4 次回波的管道残余厚度检测法可通过  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  判断小缺陷是否存在,计算小缺陷深度,进而得到残余厚度值,同时适用于缺陷尺寸小于和大于换能面积的情况,弥补了常规脉冲反射法无法检测小缺陷的不足,对于残余厚度测量的平均相对误差仅为 0.28%.

表 3 实验检测结果

Tab.3 Results of experimental tests

缺陷		脉冲回波反射法		基于 4 次回波的管道残余厚度检测法	
直径/mm	深度/mm	h/mm	相对误差/%	h/mm	相对误差/%
4	1.5	4.24	-50.10	8.46	-0.47
4	2.0	4.52	-43.50	8.02	0.25
16	2.0	8.01	0.13	8.01	0.13

### 6 结论

本文提出了一种基于 TTAO-VMD 和 4 次回波的管道残余厚度检测方法,提高了残余厚度检测精度,主要结论如下.

(1) 采用 TTAO 优化 VMD 算法可以同步找出最优  $K$  值和  $\alpha$  值组合,解决了 VMD 参数寻优困难问题,对比根据经验设定参数和只针对单一参数的寻优方法,该方法节约时间,避免了过分解与欠分解问题.

(2) 当缺陷小于换能线圈面积时,将产生缺陷与底部两种回波.由于两种回波的传递路程不同,使其回波波包峰值的时间间隔存在差别.

(3) 通过比较一次回波波包峰与三次回波波包峰值的时间间隔和二次回波波包峰与四次回波波包峰值的时间间隔,可判断两类缺陷:若  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ,则为无缺陷或大于换能面积的缺陷;若  $\Delta t_1 \neq$

$\Delta t_2$ , 则存在小于换能面积的缺陷. 进而采用基于 4 次回波的管道残余厚度检测方法得到此时的管道残余厚度值.

通过开展回波波包峰值提取的准确程度和激励脉冲参数选取的研究, 可以进一步提高电磁超声残余厚度检测精度.

#### 参考文献:

- [1] 郑凯, 方维军, 王荣元, 等. 原油管道安全运行管理及事故预防探讨[J]. 石化技术, 2022, 29(1): 198-199.
- Zheng Kai, Fang Weijun, Wang Rongyuan, et al. Discussion on safe operation management and accident prevention of crude oil pipeline[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(1): 198-199(in Chinese).
- [2] Sun H J, Urayama R, Hashimoto M, et al. Novel electromagnetic acoustic transducer for measuring the thickness of small specimen areas[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1495-1504.
- [3] 徐立军, 刘福祿, 丁一清, 等. 基于电磁超声横波的管道剩余厚度检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1767-1773.
- Xu Lijun, Liu Fulu, Ding Yiqing, et al. Residual thickness detection of pipeline based on electromagnetic ultrasonic shear wave[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1767-1773(in Chinese).
- [4] 梁慧敏, 赵昌鹏, 张晓辉, 等. 基于电磁超声的铝合金厚板缺陷检测装置[J]. 仪表技术与传感器, 2012(6): 13-15.
- Liang Huimin, Zhao Changpeng, Zhang Xiaohui, et al. Flaw detection device for thick aluminum plate based on EMAT[J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2012(6): 13-15(in Chinese).
- [5] 徐文峰, 赵建平. 电磁超声横波检测钢板减薄缺陷的有限元分析[J]. 压力容器, 2016, 33(5): 62-68.
- Xu Wenfeng, Zhao Jianping. Finite element analysis of steel thinning defect detection of electromagnetic acoustic transducer shear wave[J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(5): 62-68(in Chinese).
- [6] 刘素贞, 魏建, 张闯, 等. 基于 FPGA 的超声信号自适应滤波与特征提取[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2870-2878.
- Liu Suzhen, Wei Jian, Zhang Chuang, et al. Adaptive filtering and feature extraction of ultrasonic signal based on FPGA[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2870-2878(in Chinese).
- [7] 陈鹏, 李固, 刘美全, 等. 电磁超声检测信号的小波自适应阈值降噪研究[J]. 自动化仪表, 2012, 33(8): 9-11, 17.
- Chen Peng, Li Gu, Liu Meiquan, et al. Study on wavelet adaptive threshold de-noising for electromagnetic acoustic detection signals[J]. Automation Instruments, 2012, 33(8): 9-11, 17(in Chinese).
- [8] Chen P, Han D L, Cai Q F, et al. Application of wavelet transform and EEMD in electromagnetic acoustic signal de-noising[C]//2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). Chengdu, China, 2013: 1734-1737.
- [9] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [10] 赵国强, 曹宇东, 付华. 基于改进 VMD 和小波自适应阈值降噪的谐波检测[J/OL]. 控制工程, <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230009>, 2023-12-28.
- Zhao Guoqiang, Cao Yudong, Fu Hua. Harmonic detection based on improved VMD and wave adaptive threshold denoising[J/OL]. Control Engineering of China, <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230009>, 2023-12-28(in Chinese).
- [11] 张勇, 刘洁, 路敬祎, 等. 基于 VMD 去噪及多尺度模糊熵的管道小泄漏研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(22): 37-43.
- Zhang Yong, Liu Jie, Lu Jingyi, et al. Research on small pipeline leakage based on VMD denoising and multi-scale fuzzy entropy[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(22): 37-43(in Chinese).
- [12] 薛菲, 张宗健, 郑阳, 等. 腐蚀过程电磁超声动态监测信号观察与分析[J]. 压力容器, 2022, 39(2): 75-82.
- Xue Fei, Zhang Zongjian, Zheng Yang, et al.

- Observation and analysis of electromagnetic ultrasonic dynamic monitoring signals in corrosion process[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2022, 39(2): 75-82(in Chinese).
- [13] Zhao S J, Zhang T R, Cai L, et al. Triangulation topology aggregation optimizer: A novel mathematics-based meta-heuristic algorithm for continuous optimization and engineering applications[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 121744.
- [14] 杨理践, 李春华, 高文凭, 等. 铝板材电磁超声检测中波的产生与传播过程分析[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(6): 1218-1223.
- Yang Lijian, Li Chunhua, Gao Wenping, et al. Finite element simulation of the generation and propagation processes of electromagnetic ultrasonic wave in aluminum plate test[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(6): 1218-1223(in Chinese).
- [15] Ribichini R, Nagy P B, Ogi H. The impact of magnetostriction on the transduction of normal bias field EMATs[J]. *NDT & E International*, 2012, 51: 8-15.
- [16] Wang Ping, Li Yongrui, Yao Entao, et al. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostriction EMAT and sound velocity[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 555: 169375.
- [17] Seher M, Nagy P B. On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of electromagnetic acoustic transducers(EMATs) [J]. *NDT & E International*, 2016, 84: 1-10.
- [18] Ren W P, He J P, Dixon S, et al. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 274: 189-198.
- [19] Sun H Y, Peng L S, Huang S L, et al. Analytical model and optimal focal position selection for oblique point-focusing shear horizontal guided wave EMAT[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 120375.
- [20] Pei C X, Zhao S Q, Xiao P, et al. A modified meander-line-coil EMAT design for signal amplitude enhancement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 247: 539-546.
- [21] Xie Y D, Liu Z H, Yin L Y, et al. Directivity analysis of meander-line-coil EMATs with a wholly analytical method[J]. *Ultrasonics*, 2017, 73: 262-270.
- (责任编辑:孙立华)