DOI: 10.3901/JME.2013.04.001

基于匹配追踪算法的超声导波 管道轴向缺陷大小定量分析*

郑国军¹ 唐志峰¹ 王友钊¹ 吕福在²

(1. 浙江大学数字技术与仪器研究所 杭州 310027;

2. 浙江大学现代制造工程研究所 杭州 310027)

摘要: 超声导波技术因其单端激励、传播距离远, 100%横截面检测等特点在长距离大范围结构的无损检测和健康监测中显示出良好的应用前景, 但受制于理论及仪器技术目前基本只用于缺陷筛查, 超声导波定量化检测技术尚未得到广泛研究和应用。针对导波检测中缺陷大小定量分析问题, 提出一种基于匹配追踪算法的管道轴向缺陷大小定量分析方法。通过分析回波信号特性, 合理选择字典分解出缺陷回波信号的两端面信号, 并通过端面信号计算出轴向缺陷大小。通过有限元数值模拟以及利用 MSGW 磁致伸缩导波检测仪对人工刻伤的铝管进行算法验证试验, 结果表明该算法的误差小于 5%。

关键词: 超声导波 缺陷大小 Gabor 字典 匹配追踪

中图分类号: O347

Evaluation of Pipe Axial Defect through the Use of Ultrasonic Guided Wave and Matching Pursuit

ZHENG Guojun¹ TANG Zhifeng¹ WANG Youzhao¹ LÜ Fuzai²

(1. Institute of Advanced Digital Technologies and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Ultrasonic guided wave technology shows a good prospect in the long distance and large-scale structure of the non-destructive testing and health monitoring, thanks to its advantages such as single-ended excitation, long propagation distance, 100% detection of cross section. Constrained by theory and instrumentation technology, ultrasonic guided wave is basically only used for defect screening, ultrasonic guided wave quantitative detection technology has not been widely studied and applied. Aiming at the quantitative analysis of defect size problem in guided wave inspection, it proposes a method based on matching pursuit for quantifying the severity of pipeline defect along axial direction. By analyzing the characteristics of the echo signal, the optimized dictionary is constructed to efficiently decompose the edge reflection components from defect reflection signal. The axial extent of defect can be then quantitatively evaluated by using obtained information. Algorithm validation experiments of finite element numerical simulation as well as detecting the artificial defects in the aluminum pipe by using MSGW magnetostrictive guided wave detector show that the algorithm of error is less than 5%.

Key words: Ultrasonic guided waves Defect size Gabor dictionary Matching pursuit

0 前言

超声导波具有单端激励, 沿传播路径衰减小,

传播距离远, 引起的质点振动能遍及构件内部和表面的特点, 因此, 在管道、平板等长距离大范围结构件的无损检测中有良好的应用前景。

管道轴向缺陷特别是轴向裂纹是管道发生损伤的主要形式之一, 因裂纹引发的恶性安全事故时有发生, 每年因管道漏气、停输、污染等造成数亿元的损失。因此, 对管道轴向缺陷大小的定量分析,

* 国家自然科学基金(61271084, 51275454)、中央高校基本科研业务费专项和浙江省重大科技计划(2012C01015-2)资助项目。20121016 收到初稿, 20121221 收到修改稿

以确定缺陷的严重程度是非常有必要的。

目前,大部分超声导波管道缺陷检测的研究集中在管道缺陷的定位上,或则定性分析管道缺陷的性质。只有少量的研究指出能用导波技术估计缺陷的大小^[1-2]。LI^[3]通过轴向传感器阵列获得的多组数据,再运用二维盲卷积方法估计轴向缺陷的大小。DAVIES 等^[4]在研究合成孔径聚焦法和源成像法时分析了裂纹和小孔型缺陷尺寸与缺陷回波幅值之间的关系。邓菲等^[5]利用时间反转法确定缺陷散射波场中各导波模态的能量分布规律,通过建立的与缺陷特征相对应的关系曲线样本库,判断缺陷的参数特征。但这些方法所需检测设备比较复杂,且实际应用中也无法先预知缺陷类型再进行缺陷大小的判断,难以在工程应用中实施。

本文分析了轴向缺陷回波信号的特点,针对缺陷回波信号主要由缺陷前后两端信号组成,提出一种基于 Gabor 字典的匹配追踪算法分解出缺陷前后端信号,并通过分解出的信号信息计算缺陷轴向大小的方法。

超声导波回波信号分析研究表明,不管是规则性缺陷或者是非规则缺陷,导波遇到缺陷后反射回的回波信号主要是由缺陷前端和末端反射回波信号相互作用产生的,缺陷的主要参数特征也主要由这两部分体现^[5-8]。因此,导波回波信号中缺陷两端面信号的识别,对缺陷特征的分析判断具有非常高的价值。

另外,从理论上说,回波信号是由于导波在传播过程中遇到了声阻抗的改变,从而发生反射。当激励的导波信号遇到缺陷的前端或末端时,声阻抗发生急剧变化,从而产生比较大的回波信号。而缺陷两端面之间部分,其声阻抗变化较小,所以产生的回波信号非常微弱,而且这些微弱的回波信号在传播过程中也会衰减,所以这部分信号基本可以忽略。

由上述分析可以知道,主要由两端面回波信号组成的回波信号和缺陷的轴向长度有很大的关系。可以通过提取出回波信号的两个端面信号,从而得到缺陷的轴向长度。如图1所示,由于轴向缺陷相比导波波长往往比较小,造成缺陷两端信号相互叠加,难以直接通过信号包络最大值计算轴向缺陷大小。而且缺陷回波信号一般夹杂着大量的噪声信号,使得通过最大值计算轴向缺陷大小变得极为不精确。因此,本文提出一种基于匹配追踪的算法来分解缺陷信号。通过这种方法,可以消除噪声及其他干扰信号,分解出两端面信号。通过这两个端面信号,便能估计出轴向缺陷的大小。

图1 回波信号分解图及合并图

1 匹配追踪算法

以迭代的贪心算法为核心的匹配追踪算法^[9]能够有效提取信号中最主要的或有意义的特征,对信号的去噪、分析、修正等应用来说十分有利。

设 $D = \{\mathbf{g}_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$ 是由 $P > N$ 个范数为1的矢量所形成的字典。该字典包含 N 个线性无关的矢量,这 N 个矢量构成长度为 N 的信号空间 C^N 的一组基。匹配追踪算法首先将信号 $\mathbf{s}$ 投影到一个矢量 $\mathbf{g}_0 \in D$ 上,并计算出余项

$$\mathbf{r} = \mathbf{s} - \langle \mathbf{s}, \mathbf{g}_0 \rangle \mathbf{g}_0 \quad (1)$$

因 $\mathbf{r}$ 与 $\mathbf{g}_0$ 正交,故

$$\|\mathbf{s}\|^2 = \langle \mathbf{s}, \mathbf{g}_0 \rangle^2 + \|\mathbf{r}\|^2 \quad (2)$$

为了极小化 $\|\mathbf{r}\|$, 取 $\mathbf{g}_0 \in D$ 使得 $\langle \mathbf{s}, \mathbf{g}_0 \rangle$ 为极大。在某些情况下,找到矢量 $\mathbf{g}_0$ 并使之几乎为最优,这样在计算中更为有效

$$\langle \mathbf{s}, \mathbf{g}_0 \rangle \geq a \sup_{\gamma \in \Gamma} \langle \mathbf{s}, \mathbf{g}_\gamma \rangle \quad (3)$$

式中, a 为最佳因子, $a \in (0, 1]$ 。追踪法 $\langle \mathbf{s}, \mathbf{g}_0 \rangle$ 通过对余项 $\mathbf{r}$ 进一步作分解而迭代地进行这一过程。记 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{s}$, 对于 $m \geq 0$, 设第 m 个余项 $\mathbf{r}_m$ 已经计算出来。那么下一步的迭代是选取 $\mathbf{g}_0 \in D$ 使得

$$\langle \mathbf{r}_m, \mathbf{g}_m \rangle \geq a \sup_{\gamma \in \Gamma} \langle \mathbf{r}_m, \mathbf{g}_\gamma \rangle \quad (4)$$

将 $\mathbf{r}_m$ 投影到 $\mathbf{g}_m$ 上得

$$\mathbf{r}_m = \langle \mathbf{r}_m, \mathbf{g}_m \rangle \mathbf{g}_m + \mathbf{r}_{m+1} \quad (5)$$

由 $\mathbf{r}_{m+1}$ 与 $\mathbf{g}_m$ 的正交性得

$$\|\mathbf{r}_m\|^2 = \|\langle \mathbf{r}_m, \mathbf{g}_m \rangle \mathbf{g}_m + \mathbf{r}_{m+1}\|^2 \quad (6)$$

将式(5)对 m 从 0 到 $M-1$ 求和, 得

$$\mathbf{s} = \sum_{m=0}^{M-1} \langle \mathbf{r}_m, \mathbf{g}_m \rangle \mathbf{g}_m + \mathbf{r}_M \quad (7)$$

类似地, 将式(6)对 m 从 0 到 $M-1$ 求和得

$$\|\mathbf{s}\|^2 = \sum_{m=0}^{M-1} \|\langle \mathbf{r}_m, \mathbf{g}_m \rangle \mathbf{g}_m\|^2 + \|\mathbf{r}_M\|^2 \quad (8)$$

当 m 趋于无穷时, $\|\mathbf{r}_m\|$ 按指数级收敛于 0。也就是说信号 $\mathbf{s}$ 被完全地分解成为各个原子线性叠加。

2 匹配追踪算法对管道轴向缺陷大小定量分析原理

为了有效地检测缺陷, 激励的脉冲必须具有良好的时频域特性。选取时频域具有良好能量集中性的 Gabor 脉冲(高斯调制脉冲) $s_i(t)$ 作为激励脉冲。其表达式为

$$s_i(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2) \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (9)$$

式中, σ 表示脉冲宽度, f_c 表示脉冲中心频率, φ 表示相位。由不确定性原理可知 $s_i(t)$ 具有最小的时频窗^[10]。

图 2 显示一个典型的 Gabor 脉冲。 $\sigma=6.67 \times 10^{-6}$ s, $f_c=128$ kHz, $\varphi=0$ rad。脉冲能量聚集在脉冲的中央, 这有利于得到回波信号的到达时间。

(a) 脉冲时域波形

(b) 脉冲频域幅值图

图 2 调制高斯信号 $s_i(t)$

导波信号遇到缺陷就会发生反射, 其返回的信

号 $s_r(t)$ 可以表示为

$$s_r(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(w) S_i(w) \exp(jwt) dw \quad (10)$$

式中, $S_i(w)$ 是 $s_i(t)$ 的傅里叶变换, 反射相关系数 $R(w)$ 是个频率相关函数, 其表达式可以表示为

$$R(w) = |R(w)| \exp(j\theta(w)) \quad (11)$$

式中, $\theta(w)$ 表示相移。式(10)、(11)表明回波信号 $s_r(t)$ 相对于激励信号 $s_i(t)$ 只是幅值及相位发生了变化。而采用的激励信号为 Gabor 信号, 回波信号也将是个 Gabor 信号。因此, 可以采用基于 Gabor 字典的匹配追踪算法对回波信号进行重建。Gabor 原子可以表示为

$$g_{\Gamma}(t) = w \left(\frac{t-u}{\sigma} \right) \cos(2\pi f_c(t-u) + \varphi) \quad (12)$$

式中, $w(t)$ 是高斯窗, $w(t) = \exp(-t^2/2)$ 。Gabor 字典原子形状大小都由参数 $\gamma=(u, \sigma, f_c, \varphi)$ 所决定。

只要将导波回波信号 s 用匹配追踪分解成缺陷前后两端面信号 s_1 、 s_2 。根据其最佳匹配出原子的参数 $\gamma_1=(u_1, \sigma_1, f_{c1}, \varphi_1)$, $\gamma_2=(u_2, \sigma_2, f_{c2}, \varphi_2)$ 中的 u_1 、 u_2 。由式(13)确定缺陷轴向的大小

$$l = |u_1 - u_2| \times v/2 \quad (13)$$

式中, v 为导波的传播速度。

3 算法验证

由于导波存在多模态, 频散现象。为了避免其对试验结果造成影响, 试验都采用 T(0,1)模态的扭转波进行试验。

3.1 有限元仿真结果

在 ABAQUS/CAE 中建立铝管物理模型, 并设置参数如表 1 所示。

表 1 铝管几何、物理参数

外径 /mm	壁厚 /mm	管长 /m	弹性模量 /GPa	密度 /(kg/m ³)	泊松比
32	3	2.05	68	2 700	0.33

模拟 T(0,1)模态导波对铝管缺陷的反射特性。在铝管距离激励端 0.95 m 处设置 2 mm 槽深(10.6%横截面损失), 轴向长度为 50 mm 的缺陷。采用 Gabor 脉冲进行激励, 激励函数表达式为

$$s_i(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2) \cos(2\pi f_c t + \varphi)$$

式中, $\sigma=6.67 \times 10^{-6}$ s, $f_c=128$ kHz, $\varphi=0$ rad, 得到的回波信号如图 3 所示。

为了避免端面信号对分析的影响, 只取缺陷信号部分信号做匹配追踪分析。图 4 所示为缺陷信号。基于 Gabor 字典的匹配追踪算法对信号分解得到的

时频原子 g_1 、 g_2 ，如图 5 所示。

图 3 T(0,1) 模式导波检测铝管轴向缺陷数值模拟结果

图 4 轴向缺陷仿真信号

图 5 Gabor 匹配追踪原子

表 2 列出了匹配追踪算法最后得到的最佳原子参数结果。

表 2 仿真试验匹配追踪最佳原子参数

Gabor 原子	脉冲宽度/ μ s	时移/ μ s	中心频率/kHz	相位/rad
g_1	6.2	597	128	4.62
g_2	7.5	565	128	5.93

根据式(13)，代入 $v=3\ 150\text{ m/s}$ ，求得 $l=50.4\text{ mm}$ 。与实际 50 mm 误差小于 5%。

3.2 铝管导波试验验证

如图 6 所示，采用杭州浙大精益机电工程有限公司研发的 MSGW 磁致伸缩超声导波检测系统对人工刻伤的铝管进行检测，铝管及缺陷参数设置参照数值仿真的参数设计。采用磁致伸缩的方式发生

导波，脉冲回波的方式激发和接收信号。试验结果如图 7 所示。

图 6 铝管磁致伸缩导波试验图

图 7 铝管磁致伸缩导波信号

提取出其中的缺陷信号部分进行分析。缺陷部分信号数据如图 8 所示。

图 8 磁致伸缩导波试验缺陷部分信号

对该部分信号进行基于 Gabor 字典的匹配追踪算法分解。获得最佳原子如图 9 所示。表 3 列出了最佳原子参数。

图 9 最佳匹配原子

表 3 导波试验匹配追踪最佳原子参数

Gabor 原子	脉冲宽度/ μs	时移/ μs	中心频率/kHz	相位/rad
g_1	6.85	685	128	1.65
g_2	7.29	717	128	2.44

根据式(13),代入 $v=3\ 150\ \text{m/s}$,求得 $l=50.4\ \text{mm}$ 。与实际 $50\ \text{mm}$ 误差小于 5%。若直接取缺陷信号包络两局部最大值进行计算缺陷轴向大小,得 $l=63.4\ \text{mm}$ 与实际 $50\ \text{mm}$ 误差为 26.9%。

4 结论

(1) 分析了管道中轴向缺陷的导波回波信号的特点,提出了利用轴向缺陷两端面信号来求取轴向缺陷长度的方法。

(2) 利用基于 Gabor 字典的匹配追踪算法,消除噪声等干扰,分解出缺陷信号的前后端信号,并根据分解时所求得的最优原子,求得管道轴向缺陷大小。

(3) 通过有限元仿真试验,以及磁致伸缩导波在铝管上进行的试验,验证了该算法的有效性。

(4) 该算法的应用扩展了导波在无损检测领域的应用,为导波量化分析提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- [1] MU J, ZHANG L, ROSE J. Defect circumferential sizing by using long range ultrasonic guided wave focusing techniques in pipe[J]. Nondestructive Evaluation, 2007, 22: 239-253.
- [2] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The reflection of guided waves from notches in pipes: A guide for interpreting corrosion measurements[J]. NDT & E Int., 2004, 37: 167-180.
- [3] LI Jian. On circumferential disposition of pipe defects by long-range ultrasonic guided waves[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127: 530-538.
- [4] DAVIES J, CAWLEY P. The application of synthetically focused imaging techniques for high resolution guided wave pipe inspection[J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2007, 26: 681-688.
- [5] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间反转的管道导波缺陷参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 18-24. DENG Fei, WU Bin, HE Cunfu. A time reversal guided wave defect identification method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 18-24.
- [6] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M. Scattering of the fundamental shear horizontal mode from steps and notches in plates[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, 113 (4): 1880-1891.
- [7] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, 114: 611-625.
- [8] WANG Xiaojuan, TSE P, MECHEFSKE C, et al. Experimental investigation of reflection in guided wave-based inspection for the characterization of pipeline defects[J]. NDT & E Int., 2010, 43: 365-374.
- [9] MA J, CAWLEY P. Low-frequency pulse echo reflection of the fundamental shear horizontal mode from part-thickness elliptical defects in plates[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127: 3485-3493.
- [10] MALLAT S, ZHANG Zhifeng. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [11] GABOR D. Theory of communication[J]. J. Inst. Electr. Eng., 1946, 93: 429-457.

作者简介: 郑国军, 男, 1988 年出生。主要研究方向为超声导波信号处理。

E-mail: zhengguo22@yahoo.com.cn

唐志峰(通信作者), 男, 1977 年出生。主要研究方向为智能检测与控制, 机电一体化。

E-mail: tangzhifeng@zju.edu.cn