DOI: 10.3901/JME.2020.04.001

基于超声导波的压力容器健康监测 I: 波传导行为及损伤定位^{*}

杨 斌 胡超杰 轩福贞 罗承强 项延训 肖 飏
(华东理工大学机械与动力工程学院 上海 200237)

摘要: 严苛的使用环境造成的压力容器损伤会导致结构失效而造成巨大安全隐患; 超声导波具有大面积、长距离监测的优点, 能及时避免压力容器失效。开展基于超声导波的压力容器健康监测研究, 分三个部分。第一部分主要研究超声导波在压力容器中的传播行为及损伤定位方法。首先利用有限元法研究超声导波在压力容器中的传播行为, 开发出针对压力容器圆柱筒体及球形封头的损伤定位算法程序, 并重点讨论信号处理方法对压力容器不同部位损伤定位精度的影响。研究结果表明, 导波在压力容器中传播易产生多模态, 其在压力容器中不断地循环传播直至能量衰减耗尽, 且极少发生边界反射; 在基于超声导波的压力容器缺陷定位时, 截取合适的时域导波信号并对信号进行滤波和降噪处理能够有效提升压力容器缺陷的定位精度; 缺陷信号相对于基准信号的时间零点漂移及非检测模态波包的干扰是影响压力容器缺陷定位精度的两个主要原因, 修正后的算法对压力容器筒体和封头缺陷的定位误差在 5% 以内。

关键词: 压力容器; 超声导波; 健康监测; 损伤定位; 定位算法

中图分类号: TG156

Structural Health Monitoring of Pressure Vessel Based on Guided Wave Technology. Part I: Wave Propagating and Damage Localization

YANG Bin HU Chaojie XUAN Fuzhen LUO Chengqiang XIANG Yanxun XIAO Biao
(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract: The safety of pressure vessel is threatened by the harsh service environment in real engineering fields. Guided waves could propagate over long distance with larger area, and its application in pressure vessel monitoring could help avoiding the failure of the vessels. This research focus on the structural health monitoring of the pressure vessel by guided waves, and it is divided into three parts. The first part mainly investigates the guide wave propagating behavior and its application in damage localization in a typical pressure vessel. The guide wave propagating behavior in a pressure vessel is firstly studied by finite element method. The damage localization algorithm of the cylinder and head section of the pressure vessel is respectively built, and the effect of the signal processing method on the damage localization accuracy is mainly discussed. Results show that propagation of guided wave in the vessel could easily leads to the multimode, and it keeps propagating until the wave energy is completely attenuated with less wave reflection at the boundary. Selecting the suitable propagating duration, wave filtering and noise reduction could help enhancing the damage localization accuracy. The zero time difference between the damage and baseline signal and unused wave mode influence are the two factors that affect the damage localization accuracy in pressure vessel. Damage localization error in the cylinder and head section of the pressure vessel keeps into 5% after modified the two mentioned factors.

Key words: pressure vessel; guided waves; structural health monitoring; damage localization; damage localization algorithm

0 前言

压力容器在石油化工、水下舰艇、航空航天等

重大产品及关键部件中有着广泛应用。服役环境中, 苛刻的工作环境易造成压力容器多种失效模式相互耦合而严重威胁结构服役安全。在人类与工程失效长期斗争的过程中, 逐渐认识到, 先进的监测手段可以降低在役设备发生重大事故的风险^[1]。传统方法基于统计学原理及安全系数法等可靠性理论来保障压力容器的结构完整性^[2]。然而压力容器受到各

^{*} 青年人才托举工程(2018QNRC001)、国家自然科学基金(11702097, 51835003)、国家重点研发计划(2018YFC0808800)和中央高校基本科研业务费(222201714015)资助项目。20190225 收到初稿, 20191005 收到修改稿

种自然、载荷环境交互作用,这对其服役安全提出了新的挑战^[3]。对在役压力容器的在线监测可为进一步停机检查、维修等提供指导,降低产品突发性失效带来的损失。

与射线技术^[4]、磁性检测技术^[5]、涡流检测^[6]、表面复膜技术^[7]等无损检测技术相比较,超声技术具有精度高、传输距离远、大面积传播等诸多优点^[8-9]。通过检测/监测压力容器中的超声波声速、衰减量、声谐波、散射声信号等信息,能够获取压力容器表面及内部的损伤信息。目前,基于导波的承压装备检测/监测研究主要集中于板材、空心圆管等结构,缺乏在压力容器一类闭合体中传导行为的研究。导波在空心圆管中的传导有三种模态^[10]:只有轴向和径向位移分量的 L 模态;只有周向位移分量的 T 模态;存在三个方向上的位移且互相耦合的 F 模态。YUN 等^[11]利用纵波实现了管道轴向、周向的缺陷定位,并借助仿真手段验证了纵波在检测上述缺陷的可行性。日本 SHI 等^[12]分析了导波在复合材料缠绕管道中的传播行为,并推导了导波在管道中传导的控制方程。他们建议对于该类管道用低于初始 S0 的相速度和低于临界频率的频率范围进行检测。LI 等^[13]将压力容器中的波传导分为两部分研究:中间空心圆柱体和两边球体封头,并假设导波在其中的频散特性由中间圆柱筒体决定,随后利用 L(0, 2)模态的导波对金属压力容器进行了检测。YU 等^[14-15]分别研究了导波在球体及梯度球体中的传播行为,基于线性三维弹性体理论,利用球坐标变换得到了导波在空心球体中的传导方程。

在损伤定位算法方面,现有文献主要有以下几种方法:波束赋形原理、神经网络算法、时间反转技术、椭圆成像及概率成像等。GORGIN 等^[16]编制了一种基于 A0 模态导波的损伤尺度识别算法,经验证,该算法可以较准确地给出损伤的位置、尺寸、形状及严重程度等信息。WANDOWSKI 等^[17]采用四种不同的传感网络,比较了损伤定位结果的精度。YU^[18]展示了用于定量检测裂纹尺寸的导波场分析方法,并在铝板中进行了验证。NAZARKO 等^[19]采用人工神经网络技术训练了用于识别早期损伤的兰姆波模型,随后分别在铝板和复合材料层合板中进行了验证。基于椭圆成像原理,刘增华等^[20]开发了基于幅值全加法、全乘法及加乘组合算法,并在有机玻璃板中进行了试验验证。为了进一步提升算法定位精度,YANG 等^[21]编制了改进椭圆定位于概率成像算法相结合的信号处理程序,并在复合材料层合板的损伤定位中进行了验证。压力容器的结构为球形封头与中间圆柱段结合的统一体,如何结合

导波在压力容器中的传导规律,实现压力容器的损伤定位,仍是待解决的难题。

作为基于超声导波的压力容器健康监测研究的第一部分,本文主要研究超声导波在压力容器中的传播行为及损伤定位方法。首先理论分析了压力容器中超声导波的传播行为,随后利用有限元方法研究了超声导波在压力容器中的传播行为。结合压力容器的几何特征,针对压力容器的筒体和封头分别开展损伤定位研究,开发了相应的损伤定位算法程序,并搭建了在线损伤定位系统,讨论了信号处理方法对压力容器筒体和封头损伤定位精度的影响。

1 基本理论及方法

1.1 压力容器中的超声导波

基于相似性原理,利用空心圆柱结构中的导波基本理论来研究压力容器中的导波的传播特性。对于内外径分别为 a 、 b 的无限长无应力圆管,质点位移满足 Navier 平衡方程^[22]

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right) \quad (1)$$

式中, λ 、 μ 为介质的 Lamé 常数, $\mathbf{u}$ 为位移矢量, ρ 为介质密度。利用 Helmholtz 分解,位移矢量 $\mathbf{u}$ 可分解为膨胀标量势函数 ϕ 和等容矢量势函数 H

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times H \quad \nabla \cdot H = 0 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),化简后可得到两个波动方程

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3)$$

和

$$\nabla^2 H = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (4)$$

该波动方程的解具有如下形式

$$\begin{aligned} \phi &= f(r) \cos n\theta \cos(\omega t + \xi z) \\ H_r &= g_r(r) \sin n\theta \sin(\omega t + \xi z) \\ H_\theta &= g_\theta(r) \cos n\theta \sin(\omega t + \xi z) \\ H_z &= g_z(r) \sin n\theta \cos(\omega t + \xi z) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, n 为周向阶数, ω 为角频率, ξ 表示波数。将式(5)代入式(4),可求得关于 ϕ 、 H_r 、 H_θ 和 H_z 的偏微分方程的通解

$$\begin{aligned} f &= AZ_n(\alpha_1 r) + BW_n(\alpha_1 r) \\ g_1 &= (g_r - g_\theta) / 2 = A_1 Z_{n+1}(\beta_1 r) + B_1 W_{n+1}(\beta_1 r) \\ g_2 &= (g_r + g_\theta) / 2 = A_2 Z_{n-1}(\beta_1 r) + B_2 W_{n-1}(\beta_1 r) \\ g_3 &= A_3 Z_n(\beta_1 r) + B_3 W_n(\beta_1 r) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_L^2 - \xi^2}}$, $\beta = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_T^2 - \xi^2}}$, Z_n 和 W_n 表示

Bessel 函数或者修正的 Bessel 函数。

联立弹性力学中应力-应变和应变-位移关系并考虑导波沿空心圆柱结构内外表面处的应力自由边界, 可求得系数 A 、 B 、 A_1 、 B_1 、 A_2 和 B_2 的方程组

$$|D_{ij}|_{6 \times 6} (A \ B \ A_1 \ B_1 \ A_2 \ B_2)^T = 0 \quad (7)$$

其非零解的系数行列式应等于零, 即

$$|D_{ij}| = 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

式(8)中的 $|D_{ij}|$ 是一个关于周向阶数 n 、波数 ξ 和圆频率 ω 的 6×6 行列式, 该式即为空心圆柱结构中超声导波沿轴向传播的频散方程。求解该频散方程,

取 $n=0$, 系数行列式 $|D_{ij}|_{6 \times 6}$ 可拆分为

$$|D_{ij}|_{6 \times 6} = |D_1|_{4 \times 4} \cdot |D_2|_{2 \times 2} \quad (9)$$

式中

$$D_1 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{14} & c_{15} \\ c_{31} & c_{32} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{44} & c_{45} \\ c_{61} & c_{62} & c_{64} & c_{65} \end{bmatrix} \quad D_2 = \begin{bmatrix} c_{23} & c_{26} \\ c_{53} & c_{56} \end{bmatrix}$$

由 $|D_1| = 0$ 得到空心圆柱结构中的纵向导波模式 $L(0, m)$; 由 $|D_2| = 0$ 得到空心圆柱结构中的扭转导波模式 $T(0, m)$; 当 $n \geq 1$ 时, 求解式(7)得到空心圆柱结构中的弯曲导波模式 $F(n, m)$ 。

基于上述理论, 图 1 给出了利用 Disperse 软件绘制出的外径为 325 mm, 筒体壁厚为 5 mm, 材料为 30CrMo 钢的空心圆柱的频散曲线^[23]。由图 1 可见, 当频率小于 300 kHz 时, 导波只存在三种模式, 因此选取该范围内的激发频率有利于降低信号分析的难度。图 2 给出了相同尺寸的压力容器中 $L(0, 2)$ 模式的幅值随着频率的变化曲线。应该指出, 图 2 中所用传感器为直径 10 mm、厚度 1 mm 的锆钛酸

图 1 管道的频散曲线

图 2 导波在压力容器中的频率-幅值关系

铅压电陶瓷片。从图 2 可以看出, 激发频率在 100~130 kHz 及 210~300 kHz 两个范围内时, $L(0, 2)$ 模式的幅值较大, 因此选取该范围内的激发频率有利于提升压力容器监测中的信噪比。

1.2 有限元模拟

利用 ABAQUS/Explicit 对压力容器中的超声导波进行模拟仿真, 重点考察方孔缺陷对导波在压力容器中传播的影响规律, 方孔缺陷的面积为 50 mm²。仿真模型尺寸为外径 325 mm, 壁厚为 5 mm。材料为 30CrMo 钢, 其性能参数如表 1 所示。方孔缺陷的网格模型如图 3 所示, 模型采用结构化网格, 单元类型为 C3D8R。

表 1 压力容器材料性能参数

名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
数值	7 850	211	0.279

图 3 带有方形缺陷的有限元网格划分

模拟和试验中施加的激励信号为经汉宁窗调制的 5 周期正弦脉冲信号。为了保证模拟精度, 每个波长范围内至少应有 8 个计算单元^[21], 网格单元长度应小于导波的最小波长的 1/8。由图 1 中的频散曲线可知, 当激发频率为 210 kHz 时, 导波的波速为 3 250 m/s, 单元网格长度应小于 1.93 mm。本文中模型的网格单元尺寸选择为 1 mm。另外, 仿真中时间步长选为 1×10^{-7} s, 以满足网格内新进入计算节点对应的几何区域的扩大大于导波传播范围的扩大

的要求; 计算总时长取 1×10^{-4} s, 以使得整个结构都可以接收到超声导波信号。

1.3 压力容器中的损伤定位算法

本文采用基于椭圆及概率成像的算法对压力容器进行损伤定位。椭圆成像算法的基本思想是将波包的传播时间转换为缺陷的空间位置来实现定位, 其在文献中的应用已有很多^[23], 不在赘述。概率成像算法是在椭圆定位算法的基础上发展起来的, 该方法首先计算出所有离散网格节点到缺陷椭圆轨迹的最短距离, 再通过概率分布函数计算节点处损伤出现的概率^[24]。上述两种算法多是针对平板结构, 在压力容器中的应用还需要进行坐标转换, 其方法在我们早期的研究工作^[3]中给出, 简要介绍如下。

笛卡儿坐标下, 椭圆方程为

$$\frac{x^2}{a(x_1, y_1)^2} + \frac{y^2}{b(x_2, y_2)^2} = 1 \quad (10)$$

式中, $a(x_1, y_1)$ 和 $b(x_2, y_2)$ 分别为椭圆的两个焦点。考虑半径为 R 的圆柱, 在圆柱坐标系中, 两焦点 $c(\theta_1, y_1, R)$ 和 $d(\theta_2, y_2, R)$ 的距离为

$$D_{cd} = \sqrt{[(\theta_1 - \theta_2)R]^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (11)$$

假设缺陷在 D 处, c_g 为波速, 则圆柱坐标中椭圆轴长 a 为

$$a = \frac{d_{TD} + d_{DR}}{2} = \frac{c_g \cdot t}{2} \quad (12)$$

这样, 圆柱坐标下的椭圆方程可用式(13)表达

$$\frac{(R\theta)^2}{\left(\frac{c_g \cdot t}{2}\right)^2} + \frac{4y^2}{4\left(\frac{c_g \cdot t}{2}\right)^2 - D_{cd}^2} = 1 \quad (13)$$

同理, 球坐标中的椭圆定位方程为

$$\frac{(r \cos \theta)^2}{\left(\frac{c_g \cdot t}{2}\right)^2} + \frac{4(r \sin \theta)^2}{4\left(\frac{c_g \cdot t}{2}\right)^2 - D_{ef}^2} = 1 \quad (14)$$

式中, D_{ef} 是球坐标中的椭圆焦距。对于概率成像算法, 可用类似的变换方法得到。

1.4 压力容器的在线监测系统

所开发的在线监测系统如图 4 所示。该系统有硬件和软件两部分组成。硬件部分由信号发生器 (Tektronix AFG3021C)、信号功率放大器 (AG1006)、数字示波器 (Tektronix MDO 3012)、LXI 机箱、PXI 板卡以及压电 PZT 组成。软件部分主要有损伤定位算法及控制信号的激励、采集与处理软件组成, 后者将在第三部分研究中具体介绍。监测过程中, 函数发生器中的导波信号经功率放大器放大到 20 倍后通过 LXI 机箱和 PXI 板卡, 随后通过指定的 PZT

进入压力容器, 然后由 PZT 接收后保存在计算机中并立即按相应定位算法进行处理。

图 4 在线监测系统

压力容器筒体和封头几何不连续, 超声导波在不同部位的传播特性也不同。因此, 要实现对全尺寸压力容器的监测, 传感器阵列的布置形式也不同。压力容器筒体和球形封头的 PZT 阵列及缺陷布置形式在图 5 中给出, 具体如下: ① 压力容器筒体的传感器阵列及缺陷布置如图 5a 所示, 图中圆圈代表 PZT 压电片, 共沿周向均匀布置了 18 片; 缺陷为 $10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的人工缺陷; 导波激发频率为 210 kHz , 每次定位分别采集 306 组基准信号和 306 组带缺陷信号。② 压力容器封头的传感器阵列及缺陷布置如图 5b 所示, 在顶点布置 1 片, 在封头底部沿周向均匀布置 16 片 PZT 晶片。采用表面粘贴的试样块模拟缺陷, 试样块为 $15 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的矩形钢条。导波信号的激励频率为 220 kHz , 每次定位分别采集 272 组基准信号和 272 组带缺陷信号。

(a) 筒体

(b) 封头

图 5 压力容器不同部位的 PZT 阵列及缺陷布置

2 结果与讨论

2.1 模拟结果分析

图 6 与图 7 给出了超声导波在压力容器传播过程的模拟结果。从图中可以看出, 超声导波以激励点处为圆心开始向容器四周传播扩散。随着传播距离的增加, 超声导波的能量由于频散作用而衰减。筒体或封头中的缺陷会阻碍导波在容器壁和封头中的传播, 导波与缺陷作用以后发生了散射、反射现象。图 8 对比了数值仿真与试验获得的时域信号结果。从图中可以看出, 所采用的有限元模拟方法得到的导波信号与试验测试得到的导波信号的波形特征一致。但仿真得到的导波的一次回波和二次回波的幅值要高于对应的试验信号。与仿真结果比较, 试验中导波幅值的大幅度衰减是主要由介质吸收造成的。此外, 在试验测试中, 导波经过长距离传播后,

图 6 压力容器筒身模拟结果

图 7 压力容器封头模拟结果

图 8 仿真与试验中导波时域信号对比图

分离出了新的模态, 如图 8b 所示。这说明导波在压力容器中的传播容易产生多模态信号。另外, 通过有限元分析结果还可以看出, 与导波在平板中的传播不同, 导波在压力容器一类的闭合体中传播极少发生边界反射, 而是绕着筒体不断地循环传播, 直到能量衰减耗尽。因此在基于超声导波的压力容器缺陷定位时, 就需截取合适的时域段的导波信号, 这样既能保证导波信号包含整个压力容器的健康信息, 又不至于包含多次回波而带来的数据冗余。

2.2 压力容器筒体的损伤定位

图 9 为利用图 4 中的在线监测系统和圆柱坐标下的椭圆、概率定位算法得到的压力容器筒体的缺陷定位结果, 图中右侧色带代表缺陷出现的可能性, 其值越接近 0, 缺陷出现的可能性越大。图 9 中的结果为利用缺陷信号与基准信号做差求包络后直接成像结果。定位图中的深色空心圆圈代表筒体中的实际缺陷位置, 而浅色空心圆圈代表定位算法得到的最可能的缺陷位置。表 2 中列出了真实缺陷位置与预测缺陷位置的相对误差, 图 9a 中预测结果相对于压力容器周长和轴长的相对误差分别为 6.24% 和 1.33%; 而图 9b 中对应的误差值分别为 1.56% 和 6.67%, 可见两种定位算法得到的结果误差很大。同时, 由图可见, 直接采用缺陷信号与基准信号的差值信号包络进行成像所得结果模糊不清, 基本无法辨识缺陷位置。这主要是由于在监测过程中, 导

波信号夹杂了大量的噪声,而缺陷所引起的散射波幅值强度较低,容易被噪声信号所掩盖而很难被准确识别。

图9 利用直接包络信号缺陷定位结果

为了改进上述问题,先对监测得到的导波信号进行滤波降噪处理,再利用差值信号包络进行缺陷定位。具体操作为:首先采用 Filter 带通滤波器对监测得到的导波信号滤波处理,获取沿激励频率带宽附近分布的信号。随后采用小波变换对导波信号进行降噪处理。经过降噪处理前后的压力容器的导波信号如图 10 所示。从图 10 可以明显看出,经过小波降噪的信号光滑程度大幅度提升。同时,对导波信号的滤波降噪处理不仅较好地去除了信号中夹杂的噪声,还完整的保留了缺陷信号的反射波形。图 11 为经过上述处理后的压力容器筒体缺陷定位

图10 压力容器中导波信号的小波降噪处理

图11 利用预处理信号缺陷定位结果

结果,图中右侧色带代表缺陷出现的可能性,其值越接近 0,缺陷出现的可能性越大。从表 2 中可以

看出, 图 11a 中预测结果相对于压力容器周长和轴长的相对误差分别为 0.78% 和 2.67%; 而图 11b 中对应的误差值分别为 2.3% 和 0.51%, 与图 9 中的结果比较, 缺陷定位精度有所提升。这主要是由于经过滤波和小波降噪后的信号中的缺陷散射信号容易识别, 定位算法能够准确地捕捉到压力容器筒体中的缺陷反射信号, 进而准确地反映缺陷位置。

表 2 压力容器筒体中的损伤定位误差

图号	成像方法	周向绝对值 /mm	相对于周长的误差(%)	轴向绝对值 /mm	相对于轴长的误差(%)
图 9	椭圆	63.78	6.24	9.975	1.33
	概率	15.95	1.56	50.025	6.67
图 11	椭圆	7.96	0.78	20.025	2.67
	概率	23.93	2.3	3.825	0.51
图 15	椭圆	2.91	0.28	5.025	0.67
	概率	7.76	0.76	9.975	1.33

注: 相对误差=100×(绝对值-周长或轴长)/周长或轴长。

2.3 压力容器筒身缺陷定位的改进

从图 11 中可以看出, 定位结果与实际缺陷位置依然存在偏差, 要实现压力容器筒体损伤的精准定位, 尚需对导波信号进一步处理。研究发现, 试验室条件下, 影响压力容器缺陷定位精度的原因主要有两个: 缺陷信号相对于基准信号的时间零点漂移以及非检测模态波包的干扰。

(1) 信号时间零点漂移: 图 12 为压力容器筒身缺陷定位所用的一组导波时域信号。将缺陷信号与基准信号放大后可以发现缺陷信号相对于基准信号存在时延, 即二者的时间零点没有准确对应。这就导致在损伤定位过程中, 差值信号在幅值与传播时间上都与实际情况不同, 缺陷位置产生偏差, 定位精度无法满足要求。因此, 要提升缺陷定位精度, 需要校准缺陷信号与基准信号的时间零点。

图 12 损伤信号与基准信号的时域波形

以直达波波包的最大峰值所对应的时间点为基准来校准时间零点, 具体操作方法如下: 缺陷信号直达波最大峰值对应的时间点为 t_1 , 以及损伤信号

中直达波最大峰值所对应的时间点为 t_2 。根据 t_1 与 t_2 的大小, 在较大值所对应信号的最前端截去 $|t_1 - t_2|$ 个数据点。同时, 为了保证基准信号和损伤信号的数据点相同, 需要在较小值所对应信号的最后端截去 $|t_1 - t_2|$ 个数据点。通过该方法实现了缺陷信号与基准信号的时间零点校准, 如图 13 所示。该差值信号包络出的缺陷散射波更加接近真实情况, 从而有望提高缺陷定位精度。

图 13 时间零点校准后的导波信号的时域图

(2) 导波信号时间的截取: 图 14 为采集到的时间长度为 0.000 6 s 的压力容器筒身时域导波信号及差值包络。从图中可以看出, $T(0, 1)$ 以及 $L(0, 1)$ 这两种非检测模态的波包的差值信号包络幅值较大, 甚至接近 $L(0, 2)$ 模态的差值信号包络出的幅值。本文中采用 $L(0, 2)$ 模态作为检测模态, 因此采用 $L(0, 2)$ 模态的群速度。由椭圆成像算法原理可知, 当程序以 $T(0, 1)$ 或 $L(0, 1)$ 模态的传播时间与 $L(0, 2)$ 模态的波速的乘积作为椭圆轨迹时, 该轨迹是大于真实的缺陷椭圆轨迹的, 即缺陷并不位于该椭圆轨迹上, 这使得算法程序所确定的缺陷位置与实际位置存在一定偏差。因此, 选取合适的检测信号时长有利于提高算法程序的缺陷定位精度。以压力容器的筒身为例, 检测区域中到传感器对距离之和最大为 1.26 m, $L(0, 2)$ 模态的波速约为 5 200 m/s, 所需传播时间 2.423×10^{-4} s, 考虑波包宽度以及裕量, 所以选择时长为 3×10^{-4} s 的导波信号。

图 14 导波的各模态信号及差值包络

通过对监测信号时间零点校准及选择合适的时域信号区间后,在线监测系统得到的压力容器筒体缺陷定位结果如图 15 所示,图中右侧色带代表缺陷出现的可能性,其值越接近 0,缺陷出现的可能性越大。从表 2 中给出的定位相对误差值可以看出,图 15 中椭圆定位方法相对于压力容器周向和轴向的误差分别为 0.28%和 0.67%;而概率定位方法的误差分别为 0.76%和 1.33%。与为改进定位结果对比可见,缺陷定位精度有了大幅度提升,监测得到的缺陷位置与实际缺陷位置基本重合。另外对比图 11a 可以看出,经过改进的系统缺陷成像区域

(a) 椭圆成像

(b) 概率成像

图 15 压力容器筒体的损伤定位结果

减小,成像精度大幅度提升。从表 2 中还可以发现,采用上述方法监测压力容器筒体中的损伤,椭圆定位算法的精度优于概率定位算法。

2.4 压力容器封头的损伤定位

针对压力容器封头中的缺陷,同样采用改进的椭圆和概率定位算法进行定位。在压力容器筒身缺陷定位基础上,对监测系统采集到的封头上的导波信号进行滤波降噪,并对信号进行时间零点校准和优化时长区间等处理。对压力容器封头的损伤定位结果如图 16 所示,图中右侧色带代表缺陷出现的可能性,其值越接近 0,缺陷出现的可能性越大。由图 16 可知,封头中的缺陷定位结果与实际位置的重合度高,椭圆和概率算法中真实缺陷与预测缺陷的弧线距离分别为 6.55 mm 和 10.21 mm,二者相对于压力容器球形封头半径的相对误差分别为 2.01%和 3.14%,定位结果与实际位置的偏差小。可见,上述信号处理方法同样有利于提升封头缺陷定位精度。

(a) 椭圆成像

(b) 概率成像

图 16 压力容器封头的损伤定位结果

3 结论

(1) 对于本文所研究的压力容器一类闭合结构, 导波在其中的长距离传播易产生多模态信号。与导波在平板中的传播不同, 导波在压力容器中的传播极少发生边界反射, 而是压力容器不断地循环传播, 直到导波能量衰减耗尽。

(2) 对导波信号的滤波降噪处理在去除噪声的同时还保留了缺陷散射信号特征, 经过滤波和小波降噪的缺陷散射信号易识别, 定位算法能够准确地捕捉到压力容器筒体中的缺陷反射信号, 进而提升压力容器筒体的缺陷定位精度。

(3) 实验室条件下, 缺陷信号相对于基准信号的时间零点漂移及非检测模态波包的干扰是影响基于导波的压力容器缺陷定位精度的主要因素。修正后的定位算法得到的压力容器缺陷成像区域减小, 缺陷位置与实际缺陷位置基本重合, 成像精度大幅度提升。

参 考 文 献

- [1] TU Shantung. Life prediction and monitoring of critical industrial equipment[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2009.
- [2] 沈军, 谢怀勤, 侯涤洋. 纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的可靠性设计[J]. 复合材料学报, 2006, 23(4): 124-128.
SHEN Jun, XIE Huaqin, HOU Diyang. Reliability design of fiber wound reinforced plastics pressure vessel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(4): 124-128.
- [3] YANG Bin, XIANG Yanxun, XUAN Fuzhen, et al. Damage localization in hydrogen storage vessel by guided waves based on a real-time monitoring system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.009>.
- [4] WORACEK R, SANTISTEBAN J, FEDRIGO A, et al. Diffraction in neutron imaging-A review[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 878: 141-158.
- [5] REN Shangkun, REN Xianzhi. Studies on laws of stress-magnetization based on magnetic memory testing technique[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 449: 165-171.
- [6] AMJADIAN M, AGRAWAL A K. Modeling, design, and testing of a proof-of-concept prototype damper with friction and eddy current damping effects[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 413: 225-249.
- [7] 赵星波, 蒲建忠, 陈仙凤, 等. 奥氏体不锈钢现场复膜金相技术研究[J]. 中国特种设备安全, 2009, 25(5): 18-21.
ZHAO Xingbo, PU Jianzhong, CHEN Xianfeng, et al. Study on in-situ metallographic technology of austenitic stainless steel[J]. China Special Equipment Safety, 2009, 25(5): 18-21.
- [8] GIANNEO A, CARBONI M, GIGLIO M. Feasibility study of a multi-parameter probability of detection formulation for a Lamb waves-based structural health monitoring approach to light alloy aeronautical plates[J]. Structural Health Monitoring, 2017, 16(2): 225-249.
- [9] HONG Ming, MAO Zhu, TODD M D, et al. Uncertainty quantification for acoustic nonlinearity parameter in Lamb wave-based prediction of barely visible impact damage in composites[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 448-460.
- [10] PANT S, LALIBERTE J, MARTINEZ M, et al. Derivation and experimental validation of Lamb wave equations for an n-layered anisotropic composite laminate [J]. Composite Structures, 2014, 111: 566-579.
- [11] YUN Huixing, ZHANG Weiwei. Damage detection based on the propagation of longitudinal guided wave in a bimetal composite pipe[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2011, 2: 1-5.
- [12] SHI Jinxing, NATSUKI T, LEI Xiaowen, et al. Wave propagation in the filament-wound composite pipes conveying fluid: Theoretical analysis for structural health monitoring applications[J]. Composites Science and Technology, 2014, 98: 9-14.
- [13] LI Fucui, LIU Zhiqing, SUN Xuewei, et al. Propagation of guided waves in pressure vessel[J]. Wave Motion, 2015, 52: 216-228.
- [14] YU Jianggong, WU Bin, HE Cunfu. Characteristics of guided waves in graded spherical curved plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44: 3627-3637.
- [15] YU Jianggong, WU Bin, HUO Hongli, et al. Characteristics of guided waves in anisotropic spherical curved plates[J]. Wave Motion, 2007, 44(4): 271-281.
- [16] GORGIN R, WU Zhanjun, GAO Dongyue, et al. Damage size characterization algorithm for active structural health monitoring using the A0 mode of Lamb waves[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(3): 1-9.
- [17] WANDOWSKI T, MALINOWSKI P H, OSTACHOWICZ W M. Circular sensing networks for guided waves based structural health monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66: 248-267.
- [18] YU Lingyu, TIAN Zhenhua, LECKEY C A. Crack

- imaging and quantification in aluminum plates with guided wave wavenumber analysis methods[J]. *Ultrasonics*, 2015, 62: 203-212.
- [19] NAZARKO P, ZIEMIANSKI L. Damage detection in aluminum and composite elements using neural networks for Lamb waves signal processing[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 69: 97-107.
- [20] 刘增华, 徐营赞, 何存富, 等. 板状结构中基于 Lamb 波单模态的缺陷成像试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 232-238.
- LIU Zenghua, XU Yingzan, HE Cunfu, et al. Experimental study on defect imaging based on single Lamb wave mode in plate-like structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 232-238.
- [21] YANG Bin, XUAN Fuzhen, CHEN Shaojie, et al. Damage localization and identification in WGF/epoxy composite laminates by using Lamb waves: Experiment and simulation[J]. *Composite Structures*, 2017, 165: 138-147.
- [22] ACHENBACH J D. Wave propagation in elastic solids[M]. Amsterdam: Elsevier, 1973.
- [23] ZHAI Shuangmiao, ZHOU Shaoping, CHEN Shaojie, et al. Novel defect location method for pressure vessel by using L(0, 2) mode guided wave[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2018, 141(1), 010910.
- [24] YANG Bin, XUAN Fuzhen, JIN Pengcheng, et al. Damage localization in composite laminates by building in PZT wafer transducers: A comparative study with surface-bonded PZT strategy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21: 1-12.
-
- 作者简介: 杨斌, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料压力容器的力学性能及健康监测。
E-mail: yangbin@ecust.edu.cn
- 轩福贞(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能传感与先进健康监测技术。
E-mail: fzxuan@ecust.edu.cn