

基于阵列布置 PZT 的钢筒混凝土管道损伤 监测与评估数值模拟

齐宝欣^{1,2,3}, 武 一¹, 任庆新¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 目的 研究基于阵列式 PZT 传感系统的超声导波在钢筒混凝土管道传播机理, 并进行损伤监测与评估。方法 利用 ABAQUS 有限元软件建立了阵列式 PZT 与不同损伤程度的钢筒混凝土管道的机-电耦合有限元模型, 对压电波动法钢筒混凝土管道裂缝损伤监测进行数值模拟。结果 提出损伤指数, 建立损伤程度和损伤指数之间的关系式; 钢筒混凝土管道无损伤时接收的压电信号幅值最高; 随着损伤裂缝增大, 信号在裂缝处的损耗越大; 引入基于能量法的结构损伤指数, 将损伤指数与结构的损伤程度大小相互对照起来。提出一种基于损伤指数的评估等级, 即无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重破坏可更换管道和严重破坏无法使用。结论 提出更换钢筒混凝土管道结构的建议损伤指数, 可以显著地减少因管道泄漏造成地面塌陷等事故的发生。

关键词 压电波动法; 损伤指数; 损伤监测; 数值模拟; 阵列布置 PZT

中图分类号 TU 398; TN384 文献标志码 A

Numerical Simulation of Damage Monitoring and Evaluation of Steel Cylinder Concrete Pipes Based on Array Layout PZT

QI Baoxin^{1,2,3}, WU Yi¹, REN Qingxin¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168 ; 2. Beijing University of Technology, Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing, China, 100124; 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: The purpose of this paper is to study the propagation mechanism and damage monitoring

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678373); 辽宁省自然科学基金项目(20181023); 北京工业大学重点实验室开放课题项目(2021B06); 辽宁省教育厅项目(jytcy201825); 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817)

作者简介: 齐宝欣(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测等方面研究。

and evaluation of ultrasonic guided waves in steel cylinder concrete pipes based on the array PZT sensing system. The method is to use ABAQUS finite element software to establish the mechanical electrical coupling finite element model of array PZT and steel cylinder concrete pipes with different damage degree, and carry out numerical simulation for crack detection of steel cylinder concrete pipe by piezoelectric wave dynamic method. The result of the study is to put forward the damage index and establish the relationship between the damage degree and the damage index; the amplitude of the piezoelectric signal received by the steel cylinder concrete pipe without damage is the highest; with the increase of the damage crack, the loss of the signal at the crack is greater; the damage index of the transmission signal is calculated based on the energy method, and the quantitative relationship between the damage degree and the damage index is determined. The assessment level of damage index is no damage, slight damage, medium damage, serious damage, replaceable pipeline and serious damage cannot be used. The conclusion is that the suggested damage index of steel tube concrete pipe structure can reduce the occurrence of ground collapse caused by pipeline leakage.

Key words: piezoelectric wave method; damage index; damage monitoring; numerical simulation; array layout PZT

钢管混凝土管道因具有良好的力学特点,已经广泛应用于实际工程中。然而由于管道工作过久或者维护不善等原因,钢管混凝土管道时常会带裂缝工作,这种带裂缝的损伤状态会影响管道的正常使用,所以对钢管混凝土管道的损伤检测变得尤为重要。

压电陶瓷片(Piezoceramic Transducer, PZT)具有稳定的压电效应,在土木工程领域常被用作结构健康监测中的传感器和作动器^[1]。G. B. Song^[2]将PZT制作成压电智能骨料(Smart Aggregate),用于混凝土裂缝损伤监测、混凝土龄期强度监测和钢与混凝土组合结构的截面剥离检测等研究中,并得到了很好的损伤识别效果。孙威^[3-4]利用压电智能骨料传感器针对混凝土裂缝损伤,提出一种基于压电波动法的裂缝损伤程度判别方法,揭示了裂缝损伤的发展趋势。此外,PZT还可以激发出瑞利波和纵波对混凝土表面裂缝和内部裂缝损伤进行监测^[5-7]。

目前土木工程领域对混凝土裂缝损伤监测采用的无损检测技术主要包括声发射技术、波动法、阻抗法等方法^[8-9]。其中基于压电传感技术的管道损伤监测主要集中在钢管和具有外包层的钢管损伤监测领域^[10-13],而

对混凝土管道,尤其是钢管混凝土管道的损伤监测研究成果很少。基于此,笔者将对含有缺陷的钢管混凝土管道采用压电陶瓷片进行超声导波监测。根据超声导波在钢管混凝土管道传播的频散特性,建立不同损伤程度的钢管混凝土管道有限元模型,提出损伤指数和损伤程度的定义,并对其进行量化,建立损伤指数和损伤程度之间的关系,最后根据损伤指数提出更换管道的建议。

1 空心管道结构中导波的基本理论

1.1 导波在空心管道中传播的频散方程

根据 Navier 波动控制方程,1959年 D. C. Gazis^[14]建立了波在管道中传播的质点位移分量:

$$\mu_r = U_r(r) \cos n\theta \cos(\omega t + kz), \quad (1)$$

$$\mu_\theta = U_\theta(r) \sin n\theta \cos(\omega t + kz), \quad (2)$$

$$\mu_z = U_z(r) \cos n\theta(\omega t + kz). \quad (3)$$

式中: n 为周向阶数, $n=0,1,2,\dots$; μ_r, μ_θ, μ_z 分别为径向、周向和轴向的位移分量; U_r, U_θ, U_z 分别为径向、周向和轴向位移幅值; ω 为波圆频率; t 为时间; k 为波数。

空心圆柱体结构的自由边界条件为

$$\sigma_{\gamma\gamma} = \sigma_{\gamma z} = \sigma_{\gamma\theta} = 0. \quad (4)$$

根据应力 - 应变关系和应变 - 位移关

$$\sigma_{\gamma\gamma} = \left\{ -\lambda(\alpha^2 + K^2)f + 2\mu \left[f'' + \frac{n}{r} \cdot (g_3' - \frac{g_3}{r}) + kg_1' \right] \right\} \cos n\theta \cos (wt + kz). \quad (5)$$

$$\sigma_{\gamma\theta} = \mu \left[-\frac{2n}{r}(f' - \frac{f}{r}) - (2g_3'' - \beta^2 g_3) - k(\frac{n+1}{r}g_1 - g_1') \right] \sin n\theta \cos (wt + kz). \quad (6)$$

$$\sigma_{\gamma z} = \mu \left\{ \left[-2kf' - \frac{n}{r}(g_1' + \frac{n+1}{r} - \beta^2 + k^2)g_1 \right] - \frac{nk}{r}g_3 \right\} \cos n\theta \sin (wt + kz). \quad (7)$$

式中: r 为管道半径; λ, μ 为拉梅常数; $\sigma_{\gamma\gamma}$ 为径向应力分量; $\sigma_{\gamma\theta}$ 为周向应力分量; $\sigma_{\gamma z}$ 为轴向应力分量。

将式(5) ~ 式(7)带入式(4)得:

$$[C_{ij}]_{6 \times 6} \cdot [A \ B \ A_1 \ B_1 \ A_2 \ B_2]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (8)$$

使得行列式为 0 进行求解, 得式(9)的频散方程为^[15]

$$|C_{ij}| = 0, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

1.2 超声导波在空心管道中的传播机理

钢筒混凝土管道长 3 500 mm, 内径 60 mm, 外径 76 mm, 钢筒厚度 4 mm, 混凝土管道厚度 4 mm, 阵列布置长 × 宽 × 高为 12 mm × 6 mm × 1 mm 的 PZT(见图 1)。

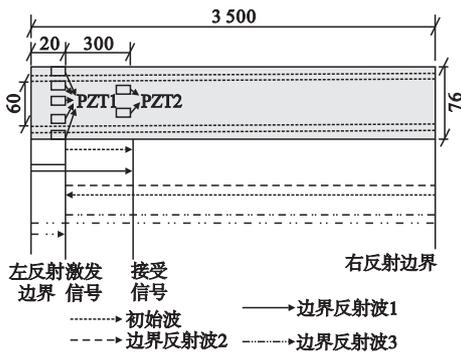


图 1 管道中波的传播机理

Fig. 1 Propagation mechanism of wave in pipes

其中阵列 PZT1 为距离管道左边界 20 mm 的绕管道一周的 16 个等距激励器作为信号发生器, PZT2 为距离 PZT1 激励器 300 mm 的绕圆周的 4 个等距信号接收器。超声导波在空心管道中的传播全过程如下: 首先, PZT1 激励的初始波在管道结构沿着 z 轴正向传播, 被 PZT2 接受, 即初始波; 其次,

系, 最终可以得到应力场的解为

被 PZT1 激励的初始波也在管道结构沿着 z 轴负向传播, 随后经过反射再沿 z 轴正方向传播, 即形成边界反射波 1; 随后, 经右端部反射后沿着 z 轴负向传播并被 PZT1 接收, 即边界反射波 2; 然后, 边界反射波 2 经过边界再反射形成边界反射波 3; 最后, PZT1 收到的信号就是这些波经各个边界多重反射到的波。

2 钢筒混凝土管道有限元模型

2.1 材料参数

笔者采用 ABAQUS 有限元软件建立钢筒混凝土管道有限元模型(见图 2)。总长度为 3 500 mm, 包括外层的 4 mm 钢筒层和内层的 4 mm 混凝土层。选用 PZT-5 型压电陶瓷片, 长 × 宽 × 高为 12 mm × 6 mm × 1 mm。左边界 20 mm 的绕管道一周的 16 个等距激励器作为信号发生器, PZT2 为距离 PZT 激励器 300 mm 的绕圆周的 4 个等距信号接收器。采用 C3D8E 单元模拟 PZT 片, 将 ABAQUS 有限元软件中的 z 方向设置为极化方向。在激励段 PZT 片上表面施加激励

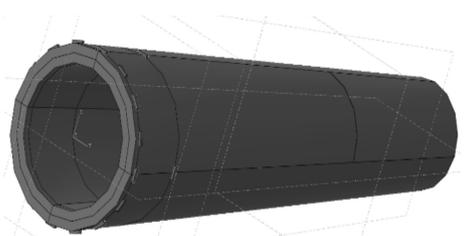


图 2 布置阵列式 PZT 的钢筒混凝土管道损伤监测有限元模型

Fig. 2 Finite element model for damage monitoring of steel cylinder concrete pipes with array PZT

信号,下表面设置为零势能面。介电常数见表1,表中 D_{11} 、 D_{22} 、 D_{33} 分别表示 d_{11} 、 d_{22} 、 d_{33} 压电方向的介电常数^[16]。由于两种介质之间的相对位移为0,所以采用 ABAQUS 的 Tie 连接将钢筒和混凝土两种介质组合到一起^[17],其中钢筒混凝土管道参数见表2。

表1 PZT 介电常数

Table 1 PZT dielectric constant setting

$D_{11}/10^{-9}$	$D_{22}/10^{-9}$	$D_{33}/10^{-9}$
8.11	8.11	7.35

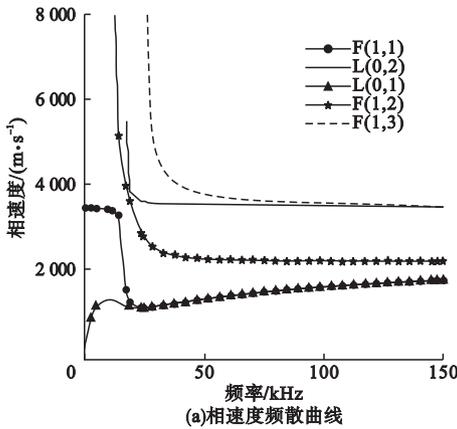


表2 钢筒混凝土管道材料参数

Table 2 Material coefficient selection of steel tube concrete pipe

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/Pa	泊松 比	纵波 波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横波 波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
钢筒	7 850	206	0.32	6 127	3 152
混凝土	240	30	0.2	3 727	2 282

2.2 频散曲线

将管道中频散公式导入到 MATLAB 中,采用二分法进行求解。图3为充液钢筒混凝土管道频散曲线。

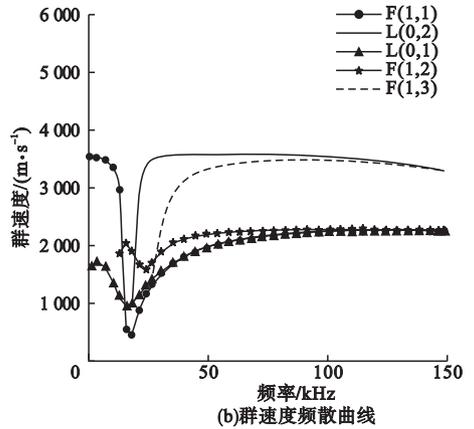


图3 钢筒混凝土管道频散曲线

Fig. 3 The dispersive curves of steel cylinder concrete pipes

由图3可以看出,钢筒混凝土管道频散曲线有L模态与F模态,通过PZT绕圆周等距摆放可以一定程度上抑制F模态^[4],更利于信号的处理。

从中频70 kHz处开始,相速度相对平缓,L(0,1)没有很明显的频散现象,并且与同是纵向模量的L(0,2)存在着较好的速度分层。在60~100 kHz频域,L(0,1)模态与L(0,2)的速度分层明显,且非频散,因此模拟时选择中频段L(0,1)的70 kHz导波。

2.3 激励信号的选择

将PZT激励器布置到距钢筒混凝土管道端部50 mm作为激励端,在PZT激励段上表面输入激励信号,在PZT激励段下表面设置零势能面,使上下表面形成电势差。在距PZT激励端200 mm处设置PZT接收器,在

接收端下表面设置零势能面。激励信号用MATLAB的汉宁窗编程(见式(10))。其中周期数 n 取5,中心频率 f 取70 kHz,这样设置的导波在中心频率周围能量较为聚集,在管道中的传播距离较远,能量耗散较少,对损伤有良好的识别效果。

$$x(t) = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n} \right) \right] \sin(2\pi f_c t). \quad (10)$$

2.4 网格尺寸与时间步长设置

2.4.1 最小网格尺寸确定

网格划分的好坏会很大程度上影响模拟结果的准确性。为了确保模型精度,网格尺寸需要小于最小波长的二十分之一^[18],即:

$$l_m < \frac{\lambda_{\min}}{20}. \quad (11)$$

式中: l_m 为网格尺寸; λ_{\min} 为导波最小波长。

同时考虑计算效率,最终确定管道网格尺寸为 3 mm。

2.4.2 时间步长设置

考虑到模拟的稳定性与效率,时间步长需要小于钢筒中速度最快波中两个单元长度的传播时间,即:

$$\Delta t \leq \frac{L_{\min}}{C_L} \quad (12)$$

式中: L_{\min} 为最小波长。 C_L 为钢筒混凝土中纵波波速。

根据 Moser 计算时间步的准则,同时要满足:

$$\Delta t \leq \frac{1}{20f_{\min}} \quad (13)$$

同时考虑到计算的时间效率,笔者设定时间步长为 40 ns。

3 损伤检测结果分析

3.1 传播过程分析

在 $Z=2$ m 处,提取 PZT2 中钢筒混凝土管道的压电信号(见图 4)。从文中频散曲线可知超声导波理论速度为 1 920.42 m/s,图中边界反射波 2 在第 3.343 ms 出现,损伤位置距离为 6.66 m,根据飞行时间法计算模拟导波速度为 1 994.02 m/s,对比误差为 -3.83%。由此可以判断,该超声导波属于 $L(0,1)$ 模态。

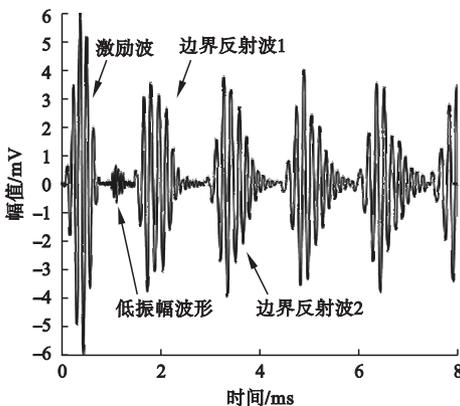


图 4 PZT2 的压电幅值信号

Fig. 4 Piezoelectric amplitude signal of PZT2

根据导波在结构中的传播速度和结构的

几何性质,设置总传播时间为 4 ms,激励信号为中心频率 70 kHz 的 $L(0,1)$ 模态导波。为了使结果更清晰,云图中将较弱的反射波过滤掉,只有入射波以及边界反射波 1。

由于 PZT 片极化方向是 z 方向,所以管道在 PZT 作用下在 z 方向产生震动,为了捕捉信号大小,在 ABAQUS 的后处理中提取 z 方向上的位移云图(见图 5)。

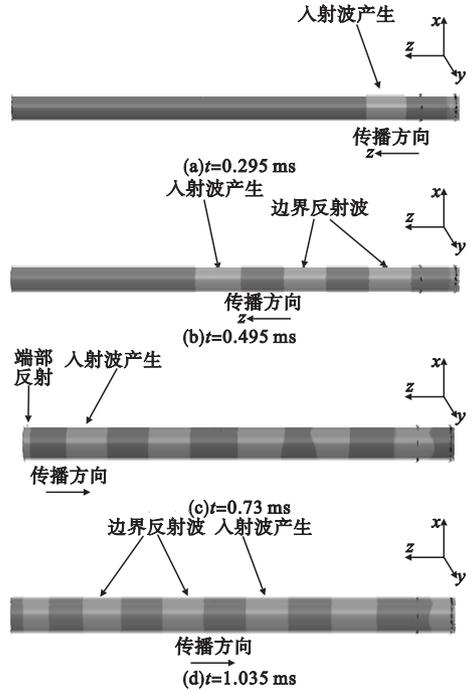


图 5 UT3 位移云图

Fig. 5 UT3 displacement plots

从图 5 可以看出, $t=0.295$ ms 时,在管道结构模型中激励产生压电超声导波,并沿管道结构向前传播 (z 轴正向)。 $t=0.495$ ms 时,入射波传播到管道中央,同时产生的边界反射 1 产生并开始同向传播。 $t=0.73$ ms 时,压电超声导波在管道结构末端发生端部反射。 $t=1.035$ ms 时,导波沿着管道结构往回传播,最终到达端部的接收位置。

为了更细致体现管道在 PZT1 激励下的作用情况,提取不同轴向位置下的位移时程曲线(见图 6)。从图 6 可以看出,随着位置的不同,得到的位移波形也不一致。距离激发端越远,收到的激励波带来的位移时间也

就越大,且在相同时间内,高频段的位移越少,脉宽越低。在 $Z=0.5\text{ m}$ 处最靠近管道端部的位移波形图可以看到,信号的脉宽较 $Z=1\text{ m}$ 与 $Z=2\text{ m}$ 的位移波形脉宽大很多,说明信号混叠较为严重,这表明越靠近管道端部,脉宽越大,端部反射效应较为明显,信号的处理也越为复杂。同时这三个位移波形图都有一个共同点:随着传播时间的增长,信号的幅值越来越低,说明传播过程中信号发生了能量耗散。使用飞行时间法计算传播速度结果见表3。

表3 导波不同轴向位置的传播速度与理论速度误差

Table 3 Propagation velocity and theoretical velocity error of guided wave at different axial positions

Z/m	传播时间/ms	速度计算值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度理论值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/%
0.5	0.260 36	1 960. 78	1 920. 42	2. 1
1	0.520 72	1 851. 85	1 920. 42	3. 5
2	1.041 4	1 818. 19	1 920. 42	5. 3

模拟中波速并不是直接观测,是基于飞行时间法,即观测位置与观测时间两个参数来确定。导波在管道传播过程中可能有少许扭转模态带来的干扰,同时导波在接触到边界时能量会产生一定的耗散,这些都会影响观测时间的结果,但影响较小。由表3可知,随着轴向位置的加深,速度模拟值与速度理论值的误差越大,这表明PZT接收器放置在距离激励器较近的位置可以减小模拟误差。

3.2 损伤深度分析

在钢筒混凝土中,外层钢筒经常会因腐蚀等原因产生缺陷。因此,损伤直接作用在钢筒层上,损伤的建立采用ABAQUS的剖切指令来删除单元格,这种方法在删除部分结构时可以保证整个网格的完整性,使模型更为完整,钢筒混凝土管道缺陷损伤位置为周向 90° ,纵深 1 mm ,长度 5 mm 。

在PZT接收端提取压电信号,对比无损工况下的压电信号,结果见图7。从图中可以看出,损伤和无损波形的主要区别:损伤信号相对于无损信号接受到的时间要相对滞后,损伤状态下的压电幅值整体降低,边界反射波1的幅值降低尤为显著,这是由于损伤的存在影响了导波在整个管道的传播进程,增强了信号能量值的耗散。

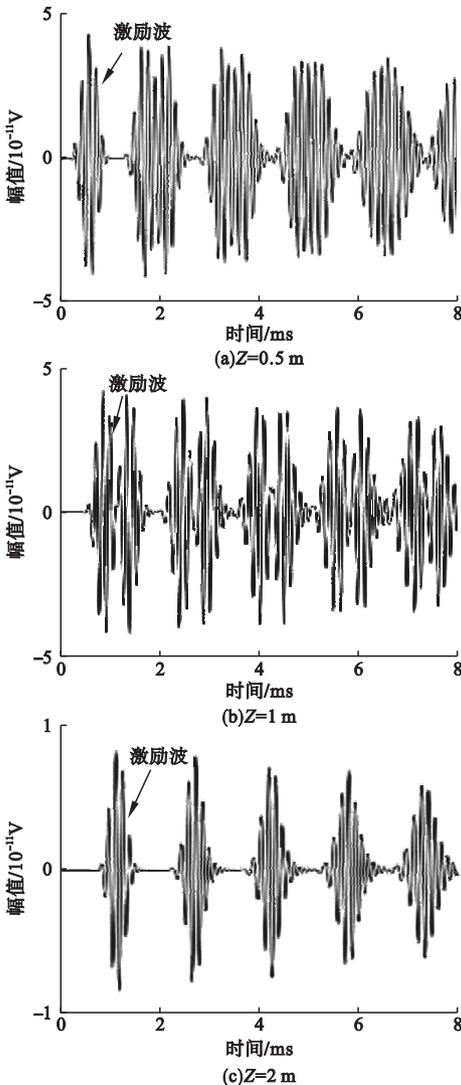


图6 不同轴向位置的节点位移时程曲线

Fig. 6 Time history curves of node displacement at different axial positions

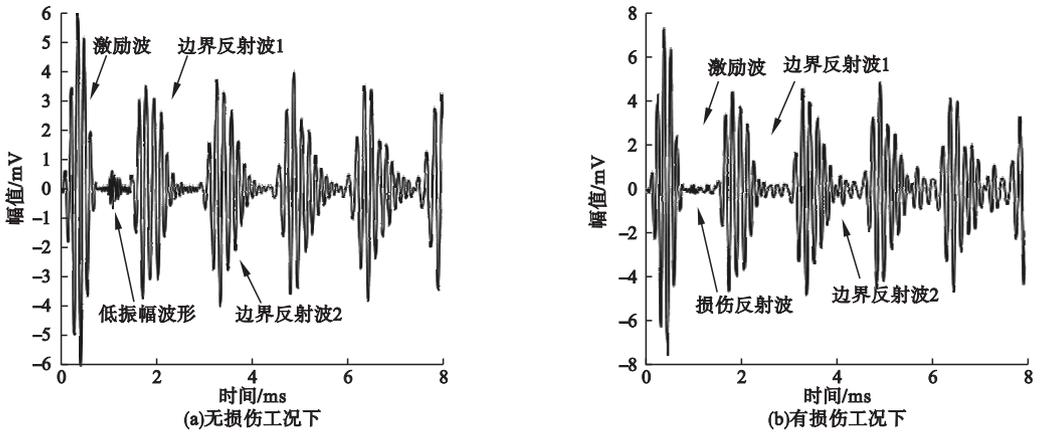


图7 有损伤与无损伤工况下的压电信号对比

Fig. 7 Comparison of piezoelectric signals under damaged and non-damaged conditions

4 损伤算法

4.1 损伤指数

基于传感信号能量的损伤识别算法,根据 PZT 接收端接收到的信号,对接收到的信号进行后处理,引入损伤指数,建立损伤识别准则:

$$E_i(x) = \sum_{t=0}^{\infty} [x_i(t)]^2. \quad (14)$$

式中: t 为模拟过程中所用的时间; $x_i(t)$ 为时长 t 对应的电势信号; $E_i(x)$ 为信号能量值,表示为每一个时间点所对应的电势信号的平方和的求和。

根据上文得到的结论,越靠近管道端部,脉宽越大,端部反射效应较为明显,信号的处理也越为复杂。且随着传播时间的增长,信号的幅值越来越低,说明传播过程中信号发生了能量耗散。由此判断管道结构接收端电势能量的高低,与损伤程度密切相关。所以引入相对健康指标 W_i 来代表管道的健康程度:

$$W_i = \frac{E_n}{E_0}. \quad (15)$$

式中: E_0 为无损伤状态下的初始能量值,将它作为一个基准,用以对比有损伤状态下的能量值; E_n 为有损状态下的能量值; W_i 为管道结构的相对健康指数, W_i 的值越大代表管

道越健康,反之则损伤程度越大。故 $0 \leq W_i \leq 1$,当 W_i 取1代表着结构无损伤。

基于相对健康指数 W_i 给出管道结构损伤指数 Y_i :

$$Y_i = 1 - W_i = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{\infty} [x_n(t)]^2}{\sum_{t=0}^{\infty} [x_0(t)]^2}. \quad (16)$$

引入损伤指数 Y_i 的目的在于,需要将健康状态下的管道结构作为一个基础,用以描述不同的管道损伤状态。损伤指数 Y_i 需要与相对健康指数 W_i 成反比,即损伤指数越大,相对健康指数越小,代表管道破坏程度越大。与相对健康指数取值范围一致, $0 \leq Y_i \leq 1$,结构为0代表结构无损伤。

先计算管道健康状态下的能量值 E_0 :

$$E_0 = \sum_{t=0}^{\infty} [x_0(t)]^2 = 0.0042.$$

再将管道具有 90° 缺陷下的能量值与无损伤能量值进行对比,得到 90° 缺陷损伤的相对健康指数:

$$W_i = \frac{E_n}{E_0} = \frac{\sum_{t=0}^{\infty} [x_n(t)]^2}{\sum_{t=0}^{\infty} [x_0(t)]^2} = \frac{0.004207}{0.004211} = 0.9988.$$

从而获得结构损伤指数:

$$Y_i = 1 - W_i = 1 - 0.9988 = 0.0011.$$

4.2 不同损伤深度的损伤参数

将纵深1 mm的损伤分别放大到2 mm

和 3 mm,其他条件不变。同理可以分别计算缺陷 2 mm 和 3 mm 的损伤指数,结果见表 4。由表 4 可以看出,随着管道结构纵深损伤程度增大,损伤指数也随之增大。

表 4 损伤深度与损伤指数对照表

Table 4 Comparison table of damage depth and damage index

缺陷纵深/mm	损伤指数 Y_i
1	0.001 1
2	0.010 9
3	0.041 1

4.3 损伤面积与损伤程度

根据提出的损伤指数 Y_i 可以看出,损伤电信号越大,损伤指数越大;而损伤电信号与管道的损伤程度,即损伤面积成正比。损伤面积为损伤部分的轴向长度与周向深度的乘积,而损伤程度是损伤面积与未损伤状态下的截面面积的比值。损伤截面面积与无损截面面积的比值示意图见图 8。

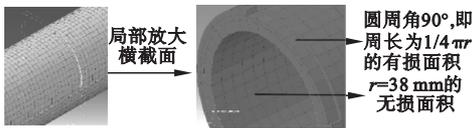


图 8 单位损伤截面面积与无损截面面积比

Fig. 8 The ratio of unit damage cross-section area to non-destructive cross-section area

表 5 为损伤深度 - 损伤截面面积 - 无损截面面积、损伤程度和损伤指数对照表。

表 5 损伤指数与损伤深度对照表

Table 5 Comparison table of damage index and damage depth

损伤纵深/mm	损伤截面面积/mm ²	无损截面面积/mm ²	损伤程度	损伤指数
1.0	59.66	238.64	0.250	0.001 1
1.5	89.49	238.64	0.375	0.003 8
2.0	119.32	238.64	0.500	0.010 9
2.5	149.15	238.64	0.625	0.024 1
3.0	178.98	238.64	0.750	0.041 1

将损伤程度和损伤指数进行二次曲线拟合得:

$$y = 0.157 8x^2 - 0.077 4x + 0.010 5. \quad (17)$$

式中: x 为管道损伤程度; y 为管道损伤指数。

将上述数据拟合得到损伤程度与损伤指数的关系曲线(见图 9)。从图中可以看出,损伤指数随着损伤程度的增大,呈曲线型增长。

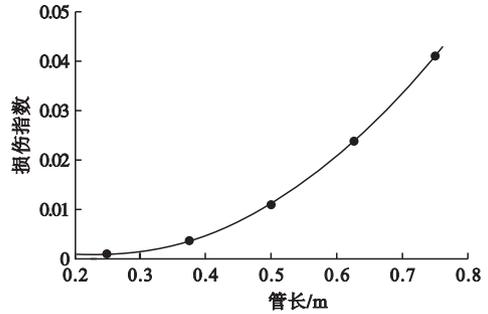


图 9 损伤程度和损伤指数关系曲线

Fig. 9 Relationship between damage degree and damage index

4.4 管道更换意见

关于损伤指标的界定范围,李赢等^[13]提出了混凝土管道的破坏等级与损伤指数的关系。笔者结合已有损伤指标研究成果,根据损伤程度给出管道更换建议(见表 6)。

表 6 管道更换意见

Table 6 Opinions pipe replacement

损伤指数	破坏等级
$Y < 0.01$	结构无明显损伤
$0.01 \leq Y < 0.02$	轻微损伤,可以继续使用
$0.02 \leq Y < 0.03$	中度损伤,可以考虑更换管道结构
$0.03 \leq Y < 0.04$	严重损伤,需要更换管道结构
$Y \geq 0.04$	结构严重破坏,无法正常使用

5 结 论

(1)通过数值模拟结果中的速度计算值与速度理论计算值相比误差较小,说明基于飞行时间法可以有效地计算超声导波在管道中的传播速度。

(2)基于能量法引入损伤指数与损伤面积对其进行分析。随着管道轴向损伤位置的加深,其波速模拟值与理论值的误差增大,PZT 接收器放置在距离激励器较近的位置可以减小模拟误差。同时损伤的引入会增强导波的能量耗散,使整体幅值降低。

(3) 基于损伤指数提出管道损伤评估等级,即无损伤、轻微损伤、中等损伤和严重破坏,以此判断管道是否需要更换。

参考文献

- [1] 焦莉,李宏男. PZT 的 EMI 技术在土木工程健康监测中的研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 102 - 108.
(JIAO Li, LI Hongnan. Progress in the EMI technique of PZT in the health monitoring of civil engineering [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2006, 26(1): 102 - 108.)
- [2] SONG G B, GU H C, MO Y L. Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures: a tutorial and a review [J]. Smart materials and structures, 2008, 17(3): 033001.
- [3] 孙威. 利用压电陶瓷的智能混凝土结构健康监测技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
(SUN Wei. Health monitoring technology for smart concrete structures using piezoelectric ceramic [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [4] 孙威, 阎石, 焦莉, 等. 基于压电波动法的混凝土裂缝损伤监测技术[J]. 工程力学, 2013, 30(增刊): 206 - 211.
(SUN Wei, YAN Shi, JIAO Li, et al. Monitoring technology for crack damage of concrete structure based on piezoelectric wave method [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(S): 206 - 211.)
- [5] 欧阳凯. 基于瑞利波的材料表面缺陷深度检测数值研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2014.
(OUYANG Kai. Numerical analysis of material surface defect depth detection using Rayleigh wave [D]. Shenzhen: Harbin University of technology (Shenzhen), 2014.)
- [6] 原志杰. 基于瑞利波法对混凝土裂缝检测的数值研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
(YUAN Zhijie. Numerical simulation of detection of concrete crack based on rayleigh wave method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.)
- [7] 李婷. 应力与材料构成对压电纵波在混凝土中的传输影响研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2015.
(LI Ting. Effect of stress and material composition on P-wave propagation of piezoelectric sensors in concrete materials [D]. Shenzhen: Harbin University of Technology (Shenzhen), 2015.)
- [8] DONG W, WU Z, ZHOU X M, et al. Experimental studies on void detection in concrete-filled steel tubes using ultra-sound [J]. Construction and building materials, 2016, 128: 154 - 162.
- [9] 周天翔, 许斌, 李彦贺, 等. 基于压电材料的钢筋砼-钢组合塔筒损伤监测[J]. 压电与声光, 2016, 38(6): 961 - 964.
(ZHOU Tianxiang, XU Bin, LI Yanhe, et al. Damage detection of a reinforced concrete-steel hybrid wind turbine tower model with PZT [J]. Piezoelectric and acoustooptics, 2016, 38(6): 961 - 964.)
- [10] 齐霁. 基于 PZT 超声导波的多裂缝管道损伤识别研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
(QI Ji. Research on multiple crack pipeline monitoring by using PZT-based ultrasonic guided waves [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.)
- [11] 袁鑫子. 基于压电超声导波能量分析法的管道结构腐蚀损伤监测研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
(YUAN Xinzi. Research on corrosion damaged pipeline using PZT-based ultrasonic guided wave energy method [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [12] 张帅. 基于压电元的管道结构损伤识别分析与试验验证[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(ZHANG Shuai. Damage identification analysis and experimental validation of pipeline structures using piezoelectric element [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [13] 李赢. 层状管道结构压电超声导波传播性质与损伤识别研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
(LI Ying. PZT-based guided wave propagation performances and damage detections for layered pipeline structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.)
- [14] GAZIS D C. Exact analysis of the plane-strain vibrations of thick-walled hollow cylinders [J]. Acoustical society of America, 1958, 30: 786 - 794.
- [15] GAZIS D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders I analytical foundation [J]. Acoustical society of America, 1959, 31(5): 568 - 573.
- [16] 齐宝欣, 张雨, 李佳诺, 等. 基于压电传感器的混凝土损伤检测数值模拟[J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 442 - 447.
(QI Baoxin, ZHANG Yu, LI Jianuo, et al. Numerical simulation of concrete damage detection based on piezoelectric sensor [J]. Piezoelectric and acoustooptics, 2018, 40(3): 442 - 447.)
- [17] 刘璐. 钢筒混凝土中的导波及其数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
(LIU Lu. Guided wave in concrete-filled steel tubes and its simulation [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2012.)
- [18] 李赢, 阎石. 超声导波在层状管道结构传播性质的有限元模拟及验证[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 645 - 652.
(LI Ying, YAN Shi. FEM analysis and verification of UGWs propagation properties in LPSs [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(4): 645 - 652.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)