

文章编号:1004-2474(2014)01-0124-04

## 基于导波技术的小口径管网实时检测系统

马书义, 武湛君, 王奕首, 刘科海

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**基于超声导波无损检测技术,发展了一种用于小口径管网实时检测的新型诊断系统。系统包括以压电陶瓷晶片为敏感器件的柔性传感器阵列,导波激励接收硬件子系统及分析软件。柔性传感器阵列能表面贴装于任意尺寸的管线外壁,并可在管线中激励和接收轴对称模态导波。与现有导波激励接收系统不同,诊断系统包含有多通道的信号转换开关矩阵,能实现管网中不同管线检测所需信号通道的快速自动切换。检测实验表明,分析软件能有效辨识大于3%管线横断面积的腐蚀损伤,并能实时检测管线的状态变化,如腐蚀损伤扩展等。诊断系统具有检测效率高,使用灵活的特点,为小口径管网的实时检测提供了有效手段。

**关键词:**小口径管网;超声导波;实时检测;腐蚀;损伤扩展

**中图分类号:**O348.8 **文献标识码:**A

## Development of a Real-time Inspection System for Small Tubes Network Based on Guided Wave Technology

MA Shuyi, WU Zhanjun, WANG Yishou, LIU Kehai

(State Key Lab. of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A novel diagnostic system for the real-time inspection of small tubes network was developed based on ultrasonic guided wave NDT technology. The diagnostic system consists of a flexible transducer array which employs piezoelectric ceramic as the sensitive element, guided wave excitation/receiving hardware subsystem and data analysis software. The flexible transducer array can be surface-mounted in a ring of any size tube's outer wall, and be able to excite and receive axial-symmetric guided waves in tubes. Difference from existing inspection system, the new diagnostic system contains multi-channel switch matrix which used for rapid automatic switching the needed signal channels for different tubes inspection. Experimental data shows that the analysis software can identify corrosion damages with more than 3% of the total cross-sectional area of the tubes effectively, and be able to real-time detection state changes of the tubes, such as corrosion damage extension. The diagnostic system has the advantages of high efficiency and flexibility, and provides an effective means for the real-time inspection of small tubes network.

**Key words:** small tubes network; ultrasonic guided waves; real-time inspection; corrosion; damage extension

### 0 引言

小口径管网(外径 $\varnothing 10\sim 30$  mm)在航空、核能等领域有着广泛的应用,具有数量多,密度大,交叉分布的特点。内部输送介质对管壁的腐蚀是小口径管网的主要失效模式。随着管线服役时间的增加,腐蚀缺陷将会进一步扩展进而使管线丧失承载能力。因此,实时检测管网中各管线的状态变化对于指导管网维护、保证管网安全运行至关重要。

针对小口径管线检测,传统的检测方法具有灵敏度高,可靠性好,但均为逐点扫描,效率低,对于交

叉分布的管线难于实现在线检测等特点,如涡流检测、超声检测等。超声导波技术能实现结构的快速无损检测,目前该技术已广泛应用于管径大于 $\varnothing 50$  mm工业管线的损伤探测。Park等<sup>[1]</sup>通过在管线内部布置传感器进行了小口径热交换管损伤检测试验,但该检测方法不适用于管线在线检测。郭秋娟等<sup>[2]</sup>采用周向导波技术开展了小口径薄壁管损伤检测试验。由于周向导波沿圆管周向传播,传感器安装后仅能检测其所在的圆管周向,要实现整条管线检测需沿管线轴向移动传感器,检测速度慢。

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2008ZX05026);国家自然科学基金资助项目(91016024);教育部新世纪人才基金资助项目(NCET-11-0055);中央高校基本科研业务费基金资助项目(DUT12LK33)

作者简介:马书义(1980-),男,河北衡水人,博士生,主要从事结构无损检测与健康评价,结构健康监测技术研究。武湛君(1972-),男,内蒙人,教授,博士,主要从事复合材料结构设计与分析,智能材料与结构,结构健康监测技术研究。

为实现小口径管网中各管线的实时快速检测,同时适应管网中管线数量多,密度大的特点,发展了一种新型诊断系统。系统包括以压电陶瓷晶片为敏感元件的柔性传感器阵列、导波激励接收硬件子系统及分析软件。通过在管线中模拟腐蚀缺陷,同时对多根小口径管线进行了检测实验,并对实验结果进行了讨论。

### 1 圆管中的导波

空心圆管中导波的传播特性复杂。图 1 为外径  $\varnothing 16\text{ mm}$ 、壁厚  $1\text{ mm}$  的空心铝管(密度  $\rho = 2.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,弹性模量  $E = 72\text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.32$ )群速度频散曲线。由图可知,圆管中沿轴向传播的导波有 3 种模态,即轴对称纵向模态  $L(0, n)$ 、轴对称扭转模态  $T(0, n)$  和非轴对称弯曲模态  $F(M, n)$ ,其中  $M = 1, 2, 3, \dots$  为周向阶次,  $n = 1, 2, 3, \dots$  为模数;在某一频率  $f$  处至少存在两个以上模态的导波;各模态导波群速度不同且均存在频散现象,即群速度随频率的变化而变化。

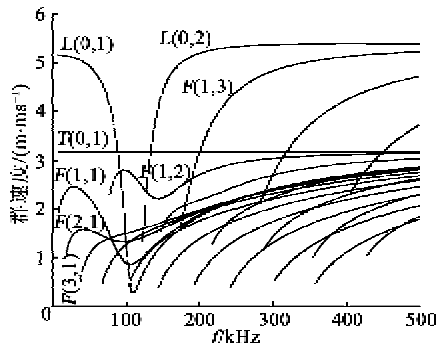


图 1 外径  $\varnothing 16\text{ mm}$ 、壁厚  $1\text{ mm}$  铝管群速度频散曲线

在导波的众多模态中,轴对称的  $L(0, 2)$  模态导波在某频段内群速度最快且几乎为常数(见图 1 频散曲线的  $200\sim 500\text{ kHz}$  频段),在回波信号的所有模态中最先到达接收换能器且波形不会发生畸变,易于在时域内识别和分辨。因此,本文选择  $L(0, 2)$  模态导波用于小口径管网的实时检测。

## 2 系统设计

### 2.1 传感器阵列设计

压电陶瓷由于其灵敏度高,可用频率范围宽,适用性好等特点在声学领域得到了广泛的应用。 $L(0, 2)$  模态导波激励要求传感器对管线表面施加轴向载荷,同时为抑制弯曲模态导波,沿管线圆周方向应均匀布置足够数量的传感器。本文选择了长方片的长度伸缩型压电陶瓷晶片作为传感器的敏感元件,其振动方向沿管线轴向。

为实现管线的实时在线检测,传感器阵列最好布置在管线外壁;管网中管线密度大,这给传感器阵列的安装带来困难,如对于并行排布且间距较小的多条管线,传统的卡具式传感器阵列难以安装在管线整个圆周环向。将压电晶片及连接压电晶片电极的铜箔导线内嵌于非导电的聚酰亚胺材料中,所构成的柔性传感器网络称为压电智能夹层<sup>[3]</sup>,具有应用灵活、安装方便的特点,在复合材料结构健康监测中得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。基于压电智能夹层传感器网络设计方法,结合长度伸缩型压电晶片在管线外壁的布置方式,设计了用于小口径管线检测的柔性传感器阵列,如图 2 所示。

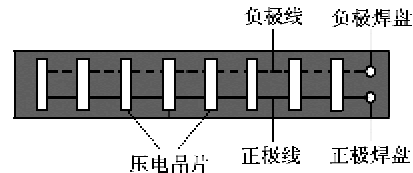


图 2 导波激励接收传感器阵列

该传感器阵列具有如下特点:

- 1) 传感器阵列总长度与被检测管线外壁周长相等。
- 2) 传感器阵列中压电晶片数量大于导波激励频率处所出现的弯曲模态最高阶数,且各压电晶片等间距分布。
- 3) 所有压电晶片的正极和负极分别通过内嵌于夹层内部的印制电路铜箔导线彼此相连,使各压电晶片能被同时激励进而对管线施加轴对称载荷。

### 2.2 硬件子系统及分析软件

现有管道导波检测系统一次只能对一根管线进行检测。为实现管网中数量众多的小口径管线的快速实时检测,设计了多通道的导波激励接收硬件系统,系统各功能模块及信号流程如图 3 所示。

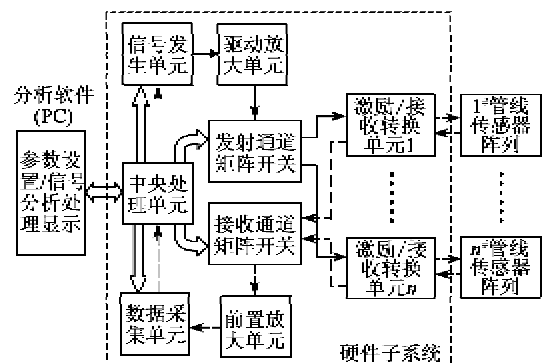


图 3 导波激励接收系统组成及信号流程图

硬件子系统中,中央处理单元核心器件选用了 PHILIPS 公司的基于 ARM 的 LPC2214 嵌入式处

理器,主要用于控制系统的工作逻辑与时序,完成与分析软件间的数据传输与交换;信号发生单元核心器件选用了 ADI 公司的 AD9708,用于激励信号波形的发生;功率放大单元采用甲乙类互补推挽式功率放大电路,用于将低压激励信号线性放大至激励压电晶片所需电压;发射通道和接收通道矩阵开关核心器件均采用了 SUPERTEX 公司的 HV20220 高压模拟开关,分别用于完成不同管线间传感器阵列激励信号通道切换和回波信号通道切换;激励接收转换单元用于完成同一传感器阵列高压激励信号与低压回波信号的隔离及无延时切换<sup>[5]</sup>;信号采集单元核心器件采用 Analog Devices 公司的 AD9278,主要完成各传感器阵列回波信号的采集。硬件子系统参数指标如表 1 所示。软件子系统主要完成管线检测所需各参数的设置,如不同管线检测所对应的激励接收通道、激励信号波形、激发频率、采样频率等及回波信号的滤波、处理与显示。

表 1 硬件子系统参数指标

激励信号频率	10~700 kHz
功放输出电压	峰-峰值 75 V
发射/接收通道数	32/32,可扩展
信号采样	最大 24 Ms/s
前置放大增益	最大 40 dB,可调
检测方式	脉冲回波和一发一收可选

分析软件设置好各参数后即可启动管网中各管线的实时检测。对于管网中第  $i$  条管线的检测,中央控制单元同时对信号产生单元、发射通道矩阵开关、接收通道矩阵开关、数据采集单元发出控制指令,信号发生单元所产生的激励信号经功率放大单元线性放大后经过选通的第  $i$  号发射通道和第  $i$  号激励接收转换电路施加到第  $i$  条管线所对应的传感器阵列,回波信号经第  $i$  号激励接收转换电路后通过选通的接收通道进入前置放大单元,并由数据采集单元完成信号的采集,所采集的数据经由中央处理单元传送到分析软件予以处理和显示,进而完成第  $i$  条管线的检测。管网中其他管线的检测过程与此相同,需要指出的是,对于管网中的  $n$  条管线检测是按照分析软件所设定的检测顺序依次完成的。

### 3 检测实验与结果分析

检测实验分别在 3 根参数一致的空心铝管中进行,铝管长 1 250 mm,外径  $\varnothing 16$  mm,壁厚 1 mm。各铝管损伤类型及位置如图 4 所示,其中 1# 铝管无

损伤;2# 铝管初始损伤为沿其周向的刻痕,刻痕圆周长度约为铝管周长的 1/5,深度约为壁厚的 1/3,约占铝管圆周横截面积的 6.7%,轴向位置距铝管 A 端约 625 mm;3# 铝管初始损伤为圆柱型通孔,通孔直径为  $\varnothing 3$  mm,约占铝管圆周横截面积的 6%,通孔中心距铝管 A 端 750 mm。

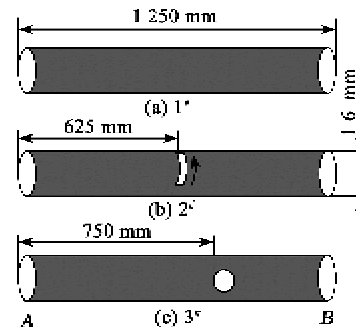
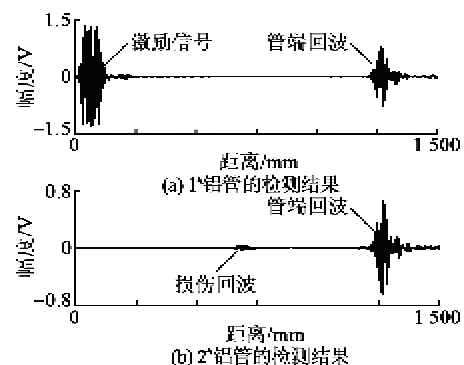
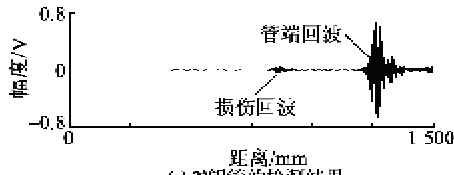


图 4 被检测铝管损伤类型及轴向位置

激励信号采用经 Hanning 窗调制的 10 周期正弦信号,该信号可有效保证信号的信噪比,对回波信号有良好的分辨率<sup>[7]</sup>。激励信号频率采用 240 kHz,由图 1 可知, $L(0,2)$  模态导波在 240 kHz 时群速度为 5.155 m/ms。传感器阵列中压电晶片尺寸长 12 mm,宽 3 mm,厚 0.5 mm。8 片压电晶片在传感器阵列中等间距布置,即沿铝管圆周方向均匀布置 8 片压电晶片。3 个传感器阵列分别通过环氧树脂粘接于各被检测铝管 A 端外壁。

图 5 为各铝管初始状态检测结果。结合  $L(0,2)$  模态的群速度分析,图 5(a) 中管端回波信号主要是  $L(0,2)$  模态,且管端回波前无其他明显反射回波,噪声信号约为管端回波的 3%,即诊断系统能辨识大于 3% 铝管横截面积的损伤。为改善滤波效果,图 5(b)、(c) 去掉了由于仪器耦合而产生的激励信号,由图 5(b)、(c) 可知,分析软件清晰显示了由于铝管金属损失而产生的回波信号,缺陷位置误差小于  $\pm 10$  mm。

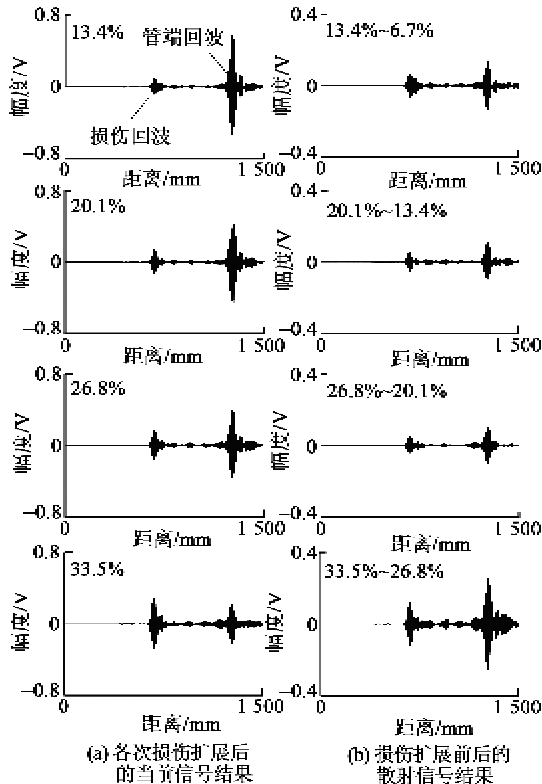




(c) 3#铝管的检测结果  
图 5 各铝管初始状态检测结果

下面进一步验证诊断系统检测损伤扩展的能力。以 2# 铝管为例,损伤沿铝管周向扩展且其深度和轴向位置不变。实验过程中,损伤共扩展 4 次,分别占铝管周长的 2/5、3/5、4/5 及整周长,即损伤约占铝管圆周横截面积的 13.4%、20.1%、26.8% 和 33.5%,激励信号波形及频率保持不变。定义损伤扩展前信号为基准信号,损伤扩展后信号为当前信号,损伤前后的信号变化为散射信号,通过分析当前信号幅度及散射信号变化程度可辨别损伤的扩展程度。

图 6 为损伤扩展实验检测结果。由图 6(a)可知,随着损伤的线性扩展,损伤回波信号幅度呈线性增大趋势,管端回波信号幅度则逐渐减小。由图 6(b)可知,损伤扩展前后,散射信号有明显的变化。



(a) 各次损伤扩展后的当前信号结果  
(b) 损伤扩展前后的散射信号结果  
图 6 2# 铝管损伤扩展检测结果

#### 4 讨论

1) 根据被检测管线的外径,可灵活设计传感器

阵列的长度及压电晶片的间距,进而使传感器阵列能够适用于任意外径的管线检测。

2) 在导波的众多模态中,轴对称的  $T(0,1)$  模态导波也是常用的检测模态,尤其适合于充液管线的检测<sup>[3]</sup>。基于本文提出的传感器阵列设计方法,使压电元件对管线施加沿其圆周切向的载荷可激励出轴对称的  $T(0,1)$  模态导波。

3) 由频散曲线可知, $L(0,2)$  模态导波用于小口径管线检测时所采用的激发频率较高,高频导波虽然对小缺陷敏感,但在管线中的衰减也较大,对于长距离的小口径管线检测,一方面,可沿管线轴向不同位置布置多圈传感器阵列进行分段检测;另一方面,也可采用较低频的  $L(0,1)$  模态导波<sup>[1]</sup>。

4) 管线结构复杂常给检测带来困难,如小口径管线中存在较多的支撑结构,这些支撑结构能够反射较强的回波信号进而给缺陷回波辨识带来困难<sup>[1]</sup>。针对管线中导波的衰减及管线结构特征优化布置传感器阵列是进一步需要讨论的问题。

#### 参考文献:

[1] PARK I K, KIM Y K, PARK S J. Application of ultrasonic guided wave to heat exchange tubes[EB/OL]. <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/243.pdf>, 2008.

[2] 郭秋娟,蔡贵喜,董瑞琪.小口径薄壁管中纵向缺陷的周向超声导波检测[J].无损检测,2009,31(3):201-205.  
GUO Qiujuan, CAI Guixi, DONG Ruiqi. Circumferential guided waves testing for longitudinal defects in small tubes[J]. Non-Destructive Testing, 2009, 31(3): 201-205.

[3] LIN M, CHANG F K. The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 919-939.

[4] QING X P, BEARD S J, KUMAR A, et al. Built-in sensor network for structural health monitoring of composite structure[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18(1): 39-49.

[5] WU Zhanjun, QING X P, CHANG F K. Damage detection for composite laminate plates with a distributed hybrid PZT/FBG sensor network[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(9): 1069-1077.

(下转第 131 页)