

# 基于 PZT 的新型柔性梳状表面波传感器研究\*

何存富, 赵华民, 吕 炎, 郑明方

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

**摘要:**针对厚壁管道表面缺陷检测,研究了一种基于 PZT 的柔性梳状表面波传感器。首先,采用有限元仿真的方法对钢板和厚壁管道上等间距梳状表面波传感器的阵元间距、阵元宽度、阵元个数、阵元长度进行了优化,以及阵元个数和阵元长度对传感器指向性的影响进行了研究,并通过优化选取背衬材料、设计背衬厚度,改善了表面波信号的拖尾现象;其次,根据仿真结果研制了新型柔性梳状表面波传感器,并进行了性能测试实验,实验结果与仿真结果吻合较好。通过仿真优化,得到当传感器阵元间距为  $\lambda_R$  ( $\lambda_R$  为相应表面波波长),阵元宽度为  $\lambda_R/2$ ,阵元个数为 5 时,传感器表面波信号拖尾较小,能量较为集中。实验表明,根据仿真参数研制的梳状表面波传感器具有良好的指向性,并且能够实现厚壁管道表面缺陷的检测。

**关键词:** 表面波; 柔性梳状传感器; 有限元方法

**中图分类号:** TG115.28 TB553 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## New type of flexible comb Rayleigh wave sensor based on the PZT

He Cunfu, Zhao Huamin, Lv Yan, Zheng Mingfang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Aiming at the surface defect detection of the thick-walled pipe, a PZT based the flexible comb Rayleigh wave transducer was proposed. Firstly, the finite element simulation was carried out to optimize the parameters of element interval, element width, element number and element length. The influence of the element number and the element length on the directivity of the transducer was studied. The tailing of the Rayleigh wave signal was suppressed by optimizing the backing materials and the backing thickness. Secondly, a new type of flexible comb Rayleigh wave transducer was developed according to simulation results. The characteristic of the transducer was tested, and experimental results agreed well with the simulation. According to the simulation and optimization, the tailing of the Rayleigh wave were shrunk and the excitation energy was concentrated, with the element interval of  $\lambda_R$  ( $\lambda_R$  equals the Rayleigh wavelength), the element width of  $\lambda_R/2$ , and the number of elements of 5. The experimental result showed that the comb Rayleigh wave transducers possessed good directivity and capability of examination of the surface defects of thick walled pipes.

**Keywords:** Rayleigh wave; comb transducer; finite element method

## 1 引言

厚壁管道作为火力发电机组不可或缺的关键部件之一,其安全对于电厂的安全和正常运转具有重要的作用。厚壁管道的缺陷形式主要为在制造和服役期间内部和内外表面的缺陷。所以需要一种能对厚壁管道表面缺陷进行快速检测的方法。超声导波技术能够快速、全面、大范围的对工件表面和内部的缺陷进行检测,特别是管<sup>[1,2]</sup>、

板类零件等<sup>[3-6]</sup>不同类型不同程度缺陷的快速识别和定位检测。表面波(也称 Rayleigh 波)作为超声导波的一种可以在光滑曲面传播而不发生反射;其能量主要集中在结构表面,衰减小、传播距离远、测量过程简便易行,同时可以判断缺陷来自表面还是内部,所以它特别适合大型复杂的厚壁结构的超声检测<sup>[7,9]</sup>。

压电式表面波传感器最常用的方式是斜入射式和梳状传感器。Pelts S. P. 等人<sup>[10]</sup>和 Rose J. L. 等人<sup>[11]</sup>首先采用梳状型式传感器通过调整齿间距在板上激励特定的导

波模态,取得了良好的效果;Borigo C 等人<sup>[12]</sup>提出了空间补偿因子,对板上环形梳状传感器进行了数学模型的建立,分析了当激励波长等于阵元间距时,能量较大;其后 Koduru J. P. 等人<sup>[13-15]</sup>又对压电环组成的梳状传感器在板上的时间,相位延迟对模态选择的作用进行了研究,达到了在全方向控制模态的目的;Manka M 等人<sup>[16]</sup>研究了基于压电陶瓷(lead zirconium titanate, PZT)的板上 Lamb 波可调频传感器用于无损检测。

前人研究中柔性梳状压电传感器主要采用聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)压电薄膜<sup>[17-18]</sup>,通过调整齿间距和加载信号相位,可以实现模态选择。但不能满足管道缺陷检测的需求。而 PVDF 柔性传感器激励性能相比 PZT 差。基于以上的需求,拟研究一种基于 PZT 的柔性梳状表面波传感器用于厚壁管道缺陷检测。为研究非等间距表面波传感器,本文基于有限元法结合实验法对柔性等间距梳状表面波传感器进行研究。

## 2 有限元法研究传感器最佳参数

### 2.1 传感器压电材料参数选取

为保证传感器具有良好的激励和接收性能,传感器选用 PZT5H 压电材料。PZT5H 的机械品质因子  $Q_m$  为 65。既能够保证传感器的激励性能,也能够有良好的接收性能。压电片采取厚度振动模式。长度和宽度由激励波长决定。厚度由激励频率决定。

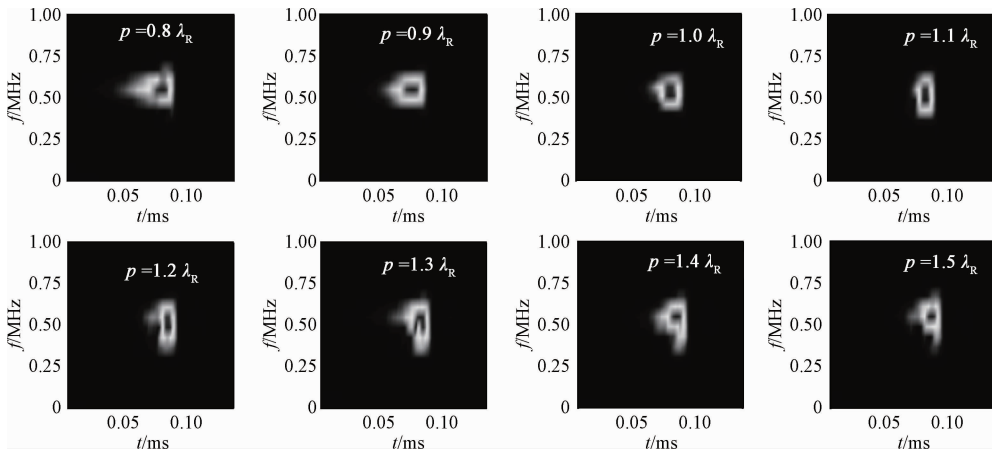


图2 不同阵元间距  $p$  时时频谱图

Fig. 2 The time-frequency spectral of different  $p$

为评价信号时频谱能量的大小,定义评价指标为:

$$\beta = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad (1)$$

式中:  $A_{ij}$  为时频谱图中  $i, j$  点的能量,为  $m, n$  区域内的信号归一化幅值总和。在同样的区域中,信号包含的数据点能量总和越大,说明信号能量越集中。

### 2.2 板上等间距梳状表面波传感器最佳参数研究

为确定传感器最佳参数,首先采用 Weidlinger Associates, Inc 公司开发的 PZFlex 软件进行有限元仿真,研究不同压电片间距  $p$ 、宽度  $a$  和压电片个数  $n$  对传感器激励表面波性能的影响。梳状传感器每个压电片为一个阵元。仿真信号采用 500 kHz, 5 周期汉宁窗调制正弦波。模型钢板宽度 600 mm, 厚度 200 mm, 模型上表面波波速为 2 880 m/s, 500 kHz 时其表面波波长  $\lambda_R$  为 5.76 mm。模型网格尺寸为表面波波长的 1/20。钢板左右和下边界设置为吸收边界。仿真模型和仿真信号如图 1 所示。

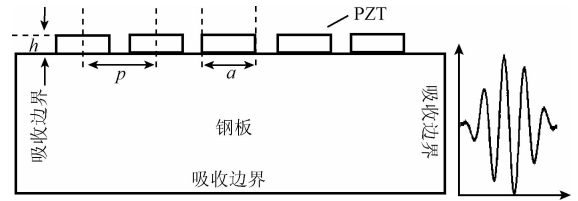


图1 二维模型仿真示意图及加载信号

Fig. 1 Two-dimensional model simulation diagram and loading signal

#### 2.2.1 阵元间距 $p$ 的优化

固定  $a$  为  $\lambda_R/2$  ( $\lambda_R$  为传感器激励表面波波长),  $n$  为 5, 分别做  $p$  等于 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 倍波长时的表面波时频谱图,如图 2 所示。

选取时频谱图中最大值的 0.5 倍作为阈值进行分析,分别计算图 2 中大于等于 0.5 倍最大值的点围成的面积内的点数,并将其对应的能量相加并做归一化后得到的结果如图 3 所示。由图 3 可得,当  $p/\lambda_R = 1.0$  时  $\beta$  最大,为最佳阵元间距。

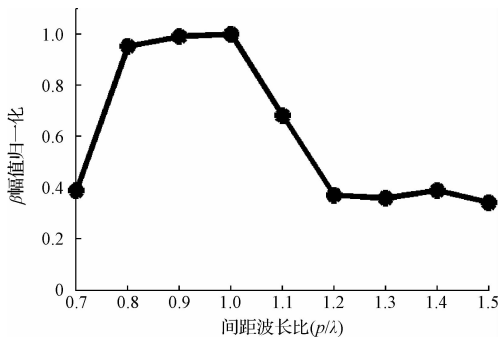


图3 不同阵元间距波长比时  $\beta$  的归一化幅值  
 Fig. 3 The normalized amplitude of  $\beta$  of the different wavelength and elements spacing ratio

图2中的能量分散原因是时域信号中的拖尾现象。信号的拖尾导致其在时域上不对称,所以定义如图4所示的区域为拖尾。为避免信号噪声影响,取时域信号最大幅值  $A_{max}$  的2%所在点与信号的交点为起始时间节点,起始时间到最大值  $A_{max}$  对应时间的时长为  $t_1$ ,沿最大值所在的时间做对称,  $2t_1$  之后的信号衰减到2%  $A_{max}$  时,该区域内的信号定义为拖尾。如图5所示,  $1.3\lambda_R$  间距时拖尾大于  $1.0\lambda_R$  间距时拖尾。经分析信号拖尾原因主要有两个:阵元间距不合适以及压电片的在加载信号结束后的余振。

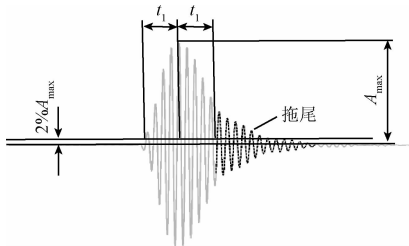


图4 信号拖尾定义示意图  
 Fig. 4 Signal trailing definition diagram

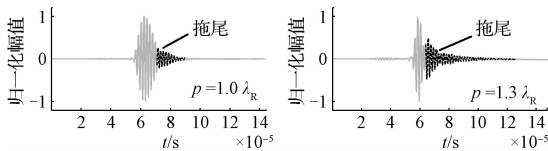


图5 阵元间距  $p = 1.0\lambda_R$  和  $1.3\lambda_R$  时域波形  
 Fig. 5 Time-domain waveform of  $p$  equal to  $1.0\lambda_R$  and  $1.3\lambda_R$

### 2.2.2 阵元宽度 $a$ 优化

固定  $p = \lambda_R, n = 5$ , 分析不同  $a/\lambda_R$  的时域波形。分别设置  $a$  从  $\lambda_R/8 \sim 7\lambda_R/8$ , 每隔  $\lambda_R/8$  变化一次。如图6所示为不同宽度  $a$  时的时频谱图。从图6中可以看出, 当  $a \leq \lambda_R/2$  时, 其能量比较集中, 对应到时域波形上则为拖尾较小, 从  $a > \lambda_R/2$  开始时频谱图能量开始分散, 所以  $a$  不能超过  $\lambda_R/2$ 。  $a$  越大, 压电片提供的力越大, 信号能

量越大, 但是从图6可以看出,  $a$  超过  $\lambda_R/2$  容易导致信号拖尾增大, 降低了传感器分辨率, 最终确定  $a = 0.5\lambda_R$  为最佳阵元宽度。

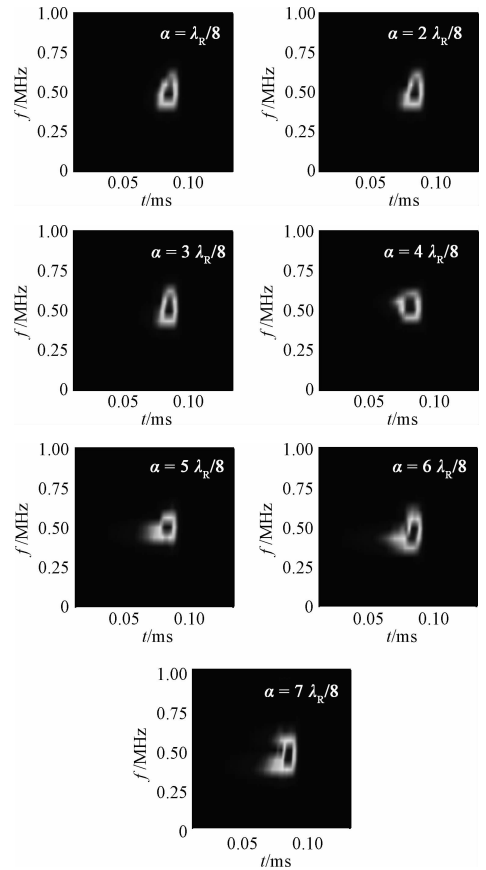


图6 不同阵元宽度  $a$  时时频谱  
 Fig. 6 Time-frequency spectral of different sizes  $a$

### 2.2.3 阵元数 $n$ 确定及其与信号指向性的关系

$n$  不仅影响传感器信号拖尾, 对传感器指向性也具有决定性作用。如图7所示, 随着阵元个数增加接收信号出现第2个小波包, 不利于缺陷信号的区分, 且阵元过多会增大传感器的尺寸。经综合分析, 确定最佳传感器阵元个数  $n = 5$ 。

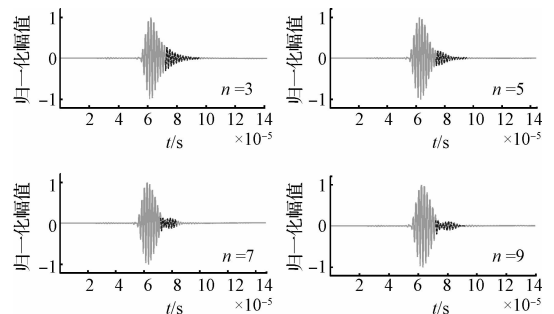


图7 阵元数为3、5、7、9时表面波时域波形  
 Fig. 7 The Rayleigh wave time domain waveform of  $n$  equal to 3, 5, 7 and 9

为研究  $n$  对传感器指向性的影响,建立如图 8 所示仿真模型,钢板厚度 50 mm。 $p$  和  $a$  设置为最佳尺寸,激励信号同前,每隔  $5^\circ$  提取以板中点为圆心,半径  $r = 100$  mm 的圆上的表面波幅值。

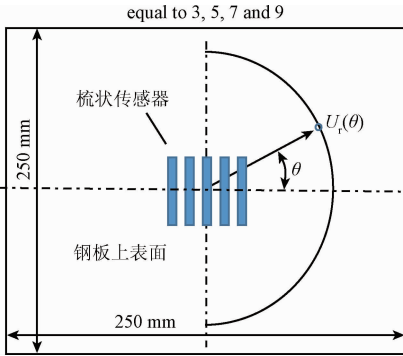


图 8 等间距传感器指向性研究模型

Fig. 8 Equal distance sensor directivity research

传感器形成指向性的条件是在发射空间的远场区。远场区一般定义为  $r\lambda > (L/2)^2$  的区域,  $L$  代表阵元长度, 设为 20 mm。所以在  $r = 100$  mm 处, 属于远场区域。定义指向性函数为:

$$D(\theta) = \frac{U_r(\theta)}{\text{Max}[U_r(\theta)]} \quad (2)$$

式中:  $U_r(\theta)$  表示  $r = 100$  mm 处与阵元中线夹角为  $\theta$  处质点的位移。通过分析不同点的信号幅值, 得到图 9 所示不同  $n$  对应指向性图。由图 9 可以看出, 当  $n \geq 5$  个时, 其波束宽度  $\Theta_{-3\text{dB}} < 20^\circ$ , 传感器都具有良好的波束指向性, 能够满足检测缺陷的需要。

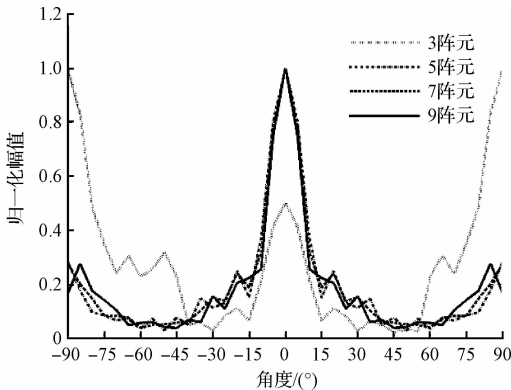


图 9 不同阵元数对传感器指向性影响

Fig. 9 The influence of  $n$  on the transducer directivity

2.2.4 阵元长度  $L$  对传感器指向性影响

$L$  代表传感器声口径, 对传感器的指向性造成直接影响, 所以需要优化阵元长度以保证传感器声指向性良好。采用图 8 模型, 研究不同  $L$  对应的传感器指向性。图 10 为  $L$  分别为 10、15、18、20、23、25 和 30 mm 时的传

感器声指向性。由图可以得, 随着  $L$  长度增加, 指向性提高, 长度大于 20 mm 时波束宽度  $\Theta_{-3\text{dB}} < 20^\circ$ , 有良好的指向性。结合传感器体积,  $L$  取 20 ~ 30 mm。

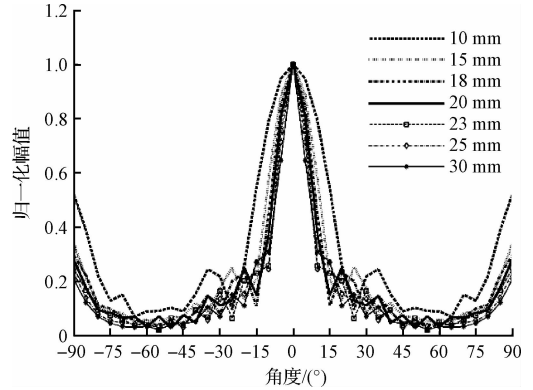


图 10 不同阵元长度对传感器指向性影响

Fig. 10 Influence of different array lengths on the transducer directivity

2.2.5 背衬材料对信号的影响

前文分析了表面波信号拖尾原因, 原因之一是阵元在激励停止时余振导致。增加背衬可以降低余振。常用的背衬材料为环氧树脂加钨粉, 不同的环氧树脂加钨粉比例对信号的吸收能力也不同。本文使用 PZflex 仿真平台, 研究软件内置的 Back5、Back10、Back15、Back20 和 Back25 几种不同比例的背衬材料对传感器信号拖尾和幅值的影响。

背衬厚度从 1 mm 逐渐变化到 24 mm。如图 11 所示, 当背衬厚度在 2 mm 时, 信号都取得最大值, 随后信号减小并基本保持不变。表面波信号的拖尾随着背衬厚度的增加得到明显改善。Back25 对信号拖尾的改善效果最好, 厚度为 24 mm 时, 信号拖尾基本消失, 所以钨粉含量越高对信号的改善效果越好。如图 12 所示, 5 阵元时无背衬和当背衬厚度为 24 mm 时的表面波信号, 阵元表面波信号的拖尾明显改善, 虽然信号幅值有所降低, 但提高了传感器分辨率, 对后期的缺陷检测有重要意义。

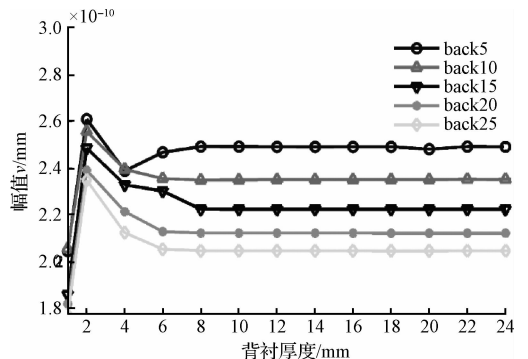


图 11 不同种类和厚度背衬材料对表面波幅值影响

Fig. 11 Influences of different types and thickness of backing material on Rayleigh wave amplitude

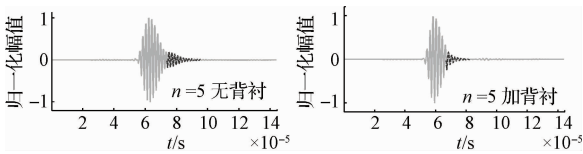


图 12  $n=5$  时背衬层对表面波信号拖尾的影响

Fig. 12 The influence of the backing layer on the tailing of the Rayleigh wave signal when the  $n$  is 5

### 2.3 厚壁管道梳状表面波传感器最佳参数研究

通过板上的仿真已经确定了最佳的梳状传感器参数。为验证钢板上的结果是否适用于管道,建立厚壁管道仿真模型进行参数研究。厚壁管道模型和仿真参数如图 13 所示。

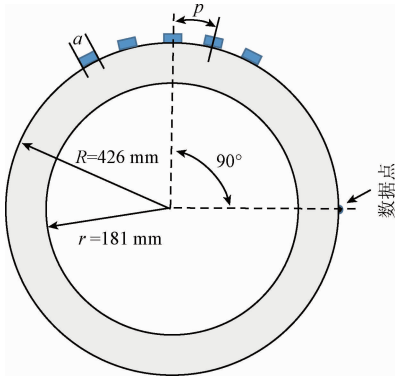


图 13 厚壁管道仿真模型

Fig. 13 Simulation model of the thick-walled

与板上分析相同,采取固定两个条件,变化第 3 个条件的方法确定最佳的  $p$ 、 $a$  和  $n$ 。得出结论与板上仿真相同。弧长  $p = \lambda_R$ ,最佳  $a = \lambda_R/2$ , $n$  为 5~8 个。最佳参数时激励的表面波时域波形图和时频谱如图 14 所示。

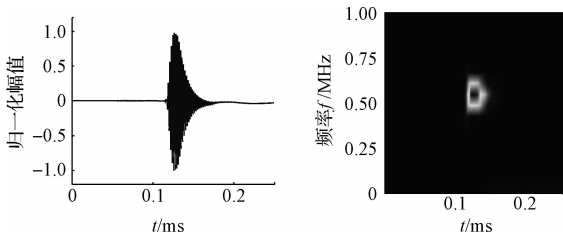


图 14 最佳参数时表面波时域波形和时频谱图

Fig. 14 The time domain waveforms and time-frequency spectral of Rayleigh wave excited on thick-walled pipes by sensor with optimum parameters

## 3 梳状传感器厚壁管道实验研究

### 3.1 传感器制作和实验装置

#### 3.1.1 传感器制作

根据有限元仿真结果,设计传感器进行厚壁管道实验,验证传感器最佳参数,并进行传感器缺陷检测实验。

结合仿真,阵元选用 PZT5H,设计  $L$  为 20 mm, $a$  为 3 mm,阵元厚度根据频率 500 kHz 进行匹配为 1 mm,厚度方向极化,采用厚度伸缩振动型式。定做的压电片经扫频分析,其谐振频率为 489 kHz,符合设计要求。

将压电片固定到采用 3D 打印制成的柔性框架中,用环氧树脂加固剂和钨粉按 20:5:1 的比例混合后浇注。然后对传感器 PZT 一面进行研磨和镀电极,保证每个压电片与被测工件都有相同的接触条件。并且在负极粘贴铜片,起到保护压电片和声阻抗匹配的作用。用 OLYMPUS 公司的横波耦合剂耦合在管道表面,最后用磁铁进行固定和压实。

#### 3.1.2 实验装置及实验系统设计

如图 15 所示,实验系统包含任意函数信号发生器、数字示波器、TEGAM 公司 2 340 电压放大器,标准放大倍数 50 倍。

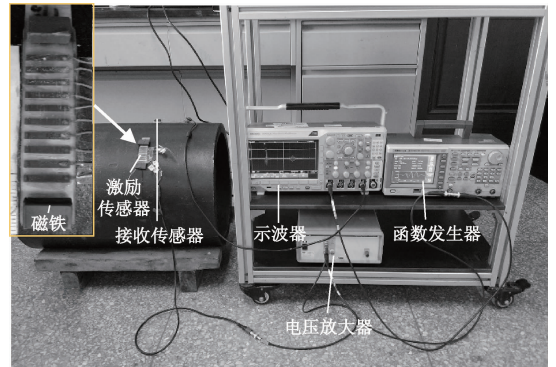


图 15 厚壁管道实验设备

Fig. 15 Experimental equipment on the thick-walled pipe

实验采用一激一收方式,接收传感器单个压电片接收的形式,激励信号与仿真相同,峰峰电压 50 V,通过改变激励传感器  $p$ 、 $a$  和  $n$  验证仿真结论。

#### 3.2 传感器阵元间距对激励表面波的影响实验

实验采用  $n=5$ , $p$  为  $\lambda_R$ 、 $3\lambda_R/4$ 、 $1.5\lambda_R$ 、 $2\lambda_R$  的 4 种不同传感器作为激励,同一个传感器接收。通过计算 500 kHz 时得到信号的时频谱值,如图 16 所示。当  $p = \lambda_R$  时,时频谱值最大,所以  $p = \lambda_R$  为最佳间距,与理论吻合。

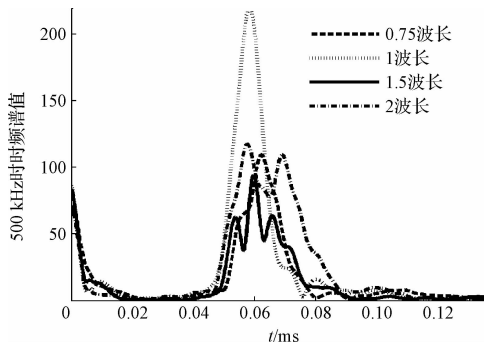


图 16 不同阵元间距  $p$  时 500 kHz 时时频谱值  
Fig. 16 500 kHz time-frequency spectral value of different  $p$

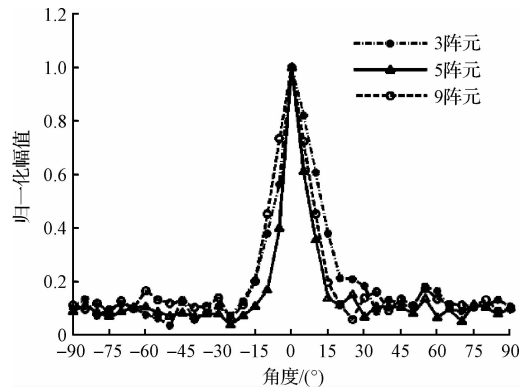


图 19 阵元个数为 3、5、9 时梳状传感器指向性  
Fig. 19 Comb transducer directivity of  $n$  equle to 3, 5, 9

3.3  $n$  对激励表面波的影响实验

采用  $p = \lambda_R, a = \lambda_R/2$  的传感器, 分别变化传感器的激励阵元个数, 从 3 变化到 10。查看制作的传感器的  $n$  对指向性和表面波幅值的影响。指向性检测实验设置如图 17 所示, 以传感器中心为圆心弧长 100 mm 为半径, 每隔  $5^\circ$  检测信号, 分析指向性。

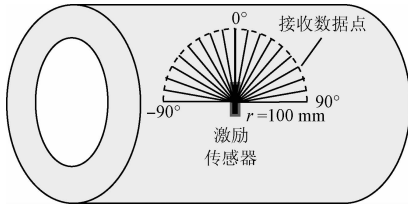


图 17 管上梳状传感器指向性实验设置  
Fig. 17 Experimental design of directivity test of the comb transducer

图 18 和 19 所示分别描述了随着阵元个数增加, 信号幅值和指向性的变化。实验发现随着  $n$  增多, 表面波信号时频谱能量减小, 也就代表信号幅值减小。原因可能是随着  $n$  增加, 压电片之间串扰增加, 导致信号幅值反而减小, 所以传感器阵元不能太多。由图 19 可得, 太少的阵元个数不利于提高传感器的指向性, 当  $n = 5$  时指向性要好于  $n = 3$ 。综合信号幅值和指向性, 最终确定阵元个数为 5。

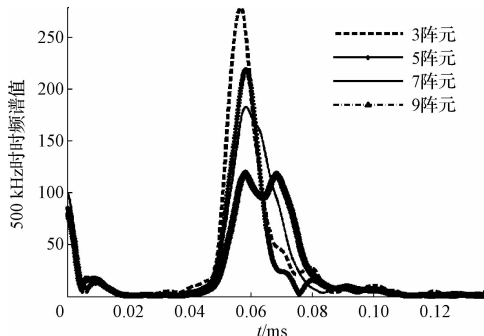


图 18 阵元个数为 3、5、7、9 时 500 kHz 时频谱值  
Fig. 18 500 kHz time-frequency spectral value of  $n$  equal to 3, 5, 7, 9

3.4 梳状传感器激励信号传播距离研究

为保证传感器能够对整个管道周向进行检测, 需要表面波信号能够沿管道传播一周以上。图 20 所示为 5 阵元激励的表面波, 接收传感器与激励传感器距离 150 mm。第 1 个波包为直达波信号, 第 2 个波包为表面波沿传感器反向传播一周的接收信号。第 3 个波包为表面波沿传感器正方向传播一周以后再接收的信号。第 4、5 个波包为沿管道周向传播两周后的信号。第 6、7 号波包为传播 3 周后的信号。所以, 5 片压电片制作的传感器激励的信号完全可以满足实验检测要求。

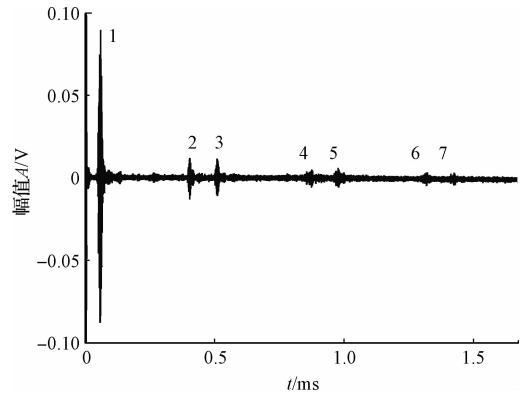


图 20 5 阵元传感器信号传播距离研究  
Fig. 20 Signal propagation distance of 5 elements transducer

4 梳状传感器缺陷检测实验

柔性传感器的设计目标是为了进行厚壁管道缺陷检测, 为测试其的缺陷识别能力, 在厚壁管道上加工了裂纹缺陷。使用 5 阵元梳状传感器进行检测。实验采用一激一收形式。如图 21 所示。激励传感器与接收传感器距离  $S_1$ , 接收传感器与缺陷距离  $S_2$ 。



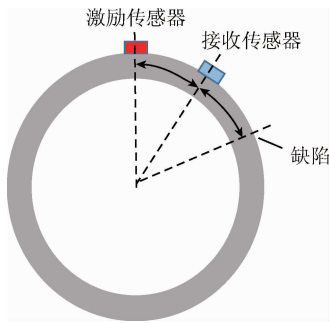


图21 缺陷检测实验示意图

Fig. 21 Diagram of the defect detection experiment

裂缝缺陷轴向长 25 mm, 宽 1 mm, 深 1 mm。设置  $S_1$  为 100 mm,  $S_2$  为 100 mm, 得到缺陷回波信号如图 22 所示。图中 0 号波包为串扰信号, 波包 1 为直达波信号。根据本管道表面波波速 2 875. 7 m/s 和传播距离 300 mm, 可以计算出传播时间为  $1.04 \times 10^{-3}$  s, 与信号 2 时间吻合, 所以得出 2 号波包为表面波遇到缺陷边界后的反射回波。

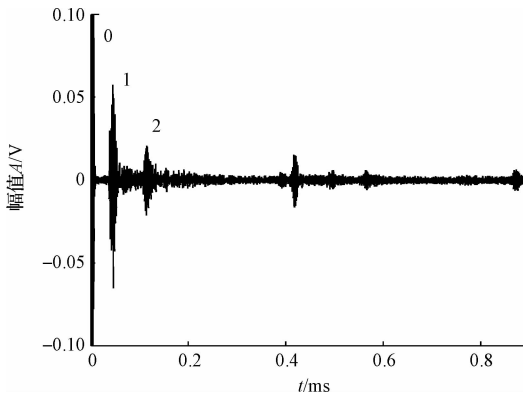


图22 管道裂纹缺陷检测时域信号

Fig. 22 Time domain signal of pipeline crack defect detection

通过实验发现, 研制的柔性表面波传感器能够检测厚壁管道表面裂缝缺陷, 为后面研究非等间距传感器打下良好基础。

## 5 结 论

运用有限元 PZFlex 软件结合时频分析方法, 对柔性等间距梳状表面波传感器进行了结构参数优化设计, 通过实验验证了仿真的结论, 并进行了管道和板上缺陷检测实验, 得到如下结论。

1) 通过在板上和厚壁管道上进行有限元仿真, 得到最佳的梳状传感器参数。梳状表面波传感器当阵元间距为  $\lambda_n$ , 阵元宽度为  $\lambda_n/2$ , 阵元个数为 5 个时, 激励的表面

波信号能量最集中, 拖尾最小。通过给压电片施加背衬, 可以明显改变表面波信号的拖尾现象, 改善梳状传感器的分辨率。

2) 根据实验结果设计实验, 测试了不同参数时对传感器激励信号的影响, 与仿真结果形成良好的印证, 并进行了指向性实验和传播距离验证实验, 结果表明, 5 阵元梳状传感器具有良好的指向性, 并且激励产生的表面波传播距离能够满足大尺寸管道表面缺陷检测的需要。

3) 采用 5 阵元柔性传感器对厚壁管道裂纹缺陷进行检测, 发现其可以明显识别管道裂纹缺陷, 为后续宽频表面波传感器的研制工作展开打下基础。

## 参考文献

- [1] 吴斌, 符浩, 何存富. 超声导波虚拟相控聚焦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3):509-516.  
WU B, HAO F, HE C F. Ultrasonic guided wave inspection based on synthetic phase control method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 509-516.
- [2] 许桢英, 罗来齐, 王匀, 等. 基于 PCA 的管道缺陷导波信号特征优化方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4):160-163.  
XU ZH Y, LUO L Q, WANG Y, et al. Feature optimization method of pipe defect guided signals based on PCA[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(4):160-163.
- [3] 张申宇, 邱雷. 导波结构健康监测系统软件数据管理模块设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 54-58.  
ZHANG SH Y, QIU L. Design of guided waves structural health monitoring system software data management module [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(2):54-58.
- [4] 朱力强, 许西宁, 余祖俊, 等. 基于超声导波的钢轨完整性检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7):1603-1609.  
ZHU L Q, XU X N, YU Z J, et al. Study on the railway integrity monitoring method based on ultrasonic guided waves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7):1603-1609.
- [5] 杜云朋, 王建斌, 靳小强. 超声导波管道检测的小波模极大值去噪法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7):683-687.  
DU Y P, WANG J B, JIN X Q. Defect detection of ultrasonic guided wave pipeline using de-noising method based on wavelet modulus maximum [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2013, 27(7): 683-687.

- [6] 杜云朋, 王建斌. 基于 LTC3872 的超声导波检测系统电源设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(2): 50-53.  
DU Y P, WANG J B. Design of power supply for ultrasonic guided wave detection based on LTC3872[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(2): 50-53.
- [7] WANG C, SUN A, XUE M, et al. Width gauging of surface slot using laser-generated Rayleigh waves[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92(7):15-18.
- [8] THRING C B, FAN Y, EDWARDS R S. Focused Rayleigh wave EMAT for characterisation of surface-breaking defects[J]. Ndt & E International, 2016, 81(7):20-27.
- [9] ZHANG X, FENG N, WANG Y, et al. An analysis of the simulated acoustic emission sources with different propagation distances, types and depths for rail defect detection[J]. Applied Acoustics, 2014, 86(8):80-88.
- [10] PELTS S P, JIAO D, ROSE J L. A comb transducer for guided wave generation and mode selection[J]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1996, 2(2):857-860.
- [11] ROSE J L, PELTS S P, QUARRY M J. A comb transducer for mode control in guided wave NDE[J]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1997, 2(2):1033-1036.
- [12] BORIGO C, ROSE J L, YAN F. A spacing compensation factor for the optimization of guided wave annular array transducers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(1):127-135.
- [13] KODURU J P, ROSE J L. Transducer arrays for omnidirectional guided wave mode control in plate like structures[J]. Smart Material Structures, 2013, 22(1): 205-205.
- [14] KODURU J P, MOMENI S, ROSE J L. Phased annular array transducers for omnidirectional guided wave mode control in isotropic plate like structures[J]. Smart Materials & Structures, 2013, 22(12):410-420.
- [15] KODURU J P, ROSE J L. Time delay controlled annular array transducers for omnidirectional guided wave mode control in plate like structures[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(10):64-75.
- [16] MA ŃKA M, ROSIEK M, MARTOWICZ A, et al. PZT based tunable interdigital transducer for Lamb waves based NDT and SHM[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2016, 78(10):71-83.

[17] HAY T R, ROSE J L. Flexible PVDF comb transducers for excitation of axisymmetric guided waves in pipe[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2002, 100(1):18-23.

[18] REN B, LISSENDEN C. PVDF Multi-element Lamb wave sensor for structural health monitoring. [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2015, 63(1):178-185.

## 作者简介



**何存富**, 1985 年于太原工业大学获得学士学位, 1990 年于华中理工大学获得硕士学位, 1996 年于清华获得博士学位, 现为北京工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机械测试理论、方法及技术、超声无损检测新技术、传感器测试技术。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

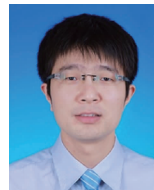
**He Cunfu** received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1985, M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1990, and Ph. D. degree from Tsinghua University in 1996. Now he is a professor and doctoral supervisor in Beijing University of Technology. His main research interests include measurement mechanical theory, method and technology, new ultrasonic nondestructive testing technologies, and sensors and measurement Technology.



**赵华民**, 分别在 2007 年和 2011 年于山西农业大学获得学士学位和硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为超声导波检测技术。

E-mail: zhaohm909@emails.bjut.edu.cn

**Zhao Huamin** received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Shanxi Agricultural University in 2007 and 2011, respectively. Now he is a Ph. D. student in Beijing University of Technology. His main research interests include ultrasonic guided waves testing technology.



**吕炎** (通讯作者), 2008 年于北京航空航天大学获学士学位, 2014 年于北京工业大学获博士学位, 现为北京工业大学讲师, 主要研究方向为声学显微镜技术、材料力学性能检测、新型换能器等。

E-mail: lvyang@bjut.edu.cn

**Lv Yan** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang University in 2008, Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2014. Now he is a lecturer in Beijing University of Technology. His main research interests include Acoustic Microscopy technique, nondestructive testing of material mechanical properties, and novel piezoelectric transducer.