

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107572

基于阵列探头的 PFA 管超声导波流量测量

董宇光, 萧旭峰, 曹 丽

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要: PFA 管材耐腐蚀性好、性能稳定, 被广泛应用在半导体等行业的药液运输中, 为精确控制药液的用时和用量, 需要研究小管径 PFA 管的非接触式流量测量方法。本文使用超声阵列外卡探头在 PFA 细管上激励超声导波, 并利用导波测量流量。首先比较超声斜探头模态选择和阵列探头模态选择原理的不同, 说明阵列探头的频率选择特性, 进而设计阵列探头阵元宽度、厚度并制作了三种间距的阵列探头, 通过频率扫描得到阵列探头的激励接收特性, 比较分析了阵列探头的模态选择效果, 并进行了流量测量实验。结果表明阵列探头可增强接收信号强度, 提高测量灵敏度, 改变阵列间距可以选择不同导波模态, 在 3 mm PFA 管上选择 L(0,5) 导波模态时流速范围 0~6.70 m/s 内的测量结果误差限为 ± 0.22 m/s。

关键词: PFA 管流量测量; 阵列探头; 超声导波激励; 模态选择

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Ultrasonic guided wave flow measurement of PFA tube based on array probe

Dong Yuguang, Xiao Xufeng, Cao Li

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Perfluoroalkoxy alkane (PFA) tubes are widely used in the transportation of chemical liquids in semiconductor industry due to its good corrosion resistance and stability. In order to precisely control the dosage and time period of various liquid medicines, non-contact flow measurement of PFA tubes with small diameters is needed urgently. In this paper, ultrasonic array probe is used to excite the ultrasonic guided wave on the PFA thin tube and the flow is measured by the guided wave. Firstly, the difference of mode selection principle between ultrasonic wedge probe and array probe is compared, and the frequency selection characteristic of array probe is explained. Then, the width and thickness of array probe element are designed, and three kinds of array probe with different element spacing are prepared. The exciting and receiving characteristics of the array probe are obtained through frequency scanning. The performance of mode selection of the array probe is compared and analyzed, and the flow measurement experiment is carried out. Results show that the array probe can enhance the received signal's magnitude and improve the measurement sensitivity. Different guided wave modes can be selected by changing the array spacing. When the L(0,5) guided wave mode is selected on the 3 mm PFA tube, the error limit of the measurement results in the flow rate range of 0~6.70 m/s is ± 0.22 m/s.

Keywords: PFA tube flow measurement; array probe; ultrasonic guided wave excitation; mode selection

0 引 言

超声导波流量计实现了“外卡式”的简便安装方法, 而不需要侵入到管体内部, 它需要严格控制激励方法, 才能激励出可以利用的单一模态的导波。通常在金属管上的导波流量测量中使用斜探头进行激励和模态选择。而 PFA 树脂管有着较低的声阻抗、较低的声速和仅有

几个 mm 的较小管径, 同时振动衰减较大, 接收信号微弱, 因此导波在管体中的振动分布特性以及流量测量机理与金属管有较大不同。Sato 等^[1-2]在 2006、2007 年研究过小口径管的流量测量问题, 给出了液体流速对导波相速度和群速度的线性影响的结果, 并验证了顺逆流时间差与流速成线性关系。Li 等^[3]在 2016 年研究了利用环形压电陶瓷片和圆锥楔块在 PFA 管上激励导波的方法, 但是通过圆锥楔块斜入射激励存在入射角度单一、时差-流

速测量曲线灵敏度小的缺点。

另一方面,超声阵列探头激励技术在缺陷检测领域已被广泛应用^[4],对阵列探头应用相控阵激励技术可以实现全聚焦二维或三维成像^[5-7],从而更精准地检测目标缺陷。而对于板材、管材等材料的缺陷检测,导波相控阵技术也已经有应用^[8-9]。如 Kannajosyula 等^[10]和 Borigoc 等^[11]采用时延和相控技术实现了导波的单向激励和接收。另外,Rajagopalan 等^[12]曾采用单激励多接收方式的相控阵实现了复合材料的缺陷检测。

考虑到楔块斜入射激励在 PFA 细管的流量测量效果并不理想^[3],以及阵列探头可激励出信号强度增强的导波,本文提出基于阵列探头的导波激励方法在 PFA 管上的流量测量应用。首先,分析导波模式增强选择的原理和方法,然后利用有限元仿真分析方法设计阵列探头的结构和参数,最后在 PFA 管上进行频率扫描实验确定激励频率,并进行流量测量实验。

1 导波模式选择

1.1 导波的频散性质

超声波在传播过程中受到结构件的有限尺寸边界限制,以反射和折射的形式与边界发生相互作用,形成了沿结构件传播的超声导波^[13]。导波具有频散特性,可以用频散曲线来描述。导波模式的相速度 c_{ph} 和群速度都随频率变化。Lowe^[14]在 1995 年提出了利用矩阵计算多层介质中相速度与群速度的关系的方法,并编写了计算用的软件 Disperse^[15]。图 1 中图例为 cph 的多条曲线是利用 Disperse 软件绘制的 3 mm PFA 充水管相速度频散曲线,其中标出的 L(0,1)、L(0,2)、…、L(0,6) 分别为导波的各阶模式。图 1 中的黑线为虚拟的管中水柱的频散曲线,称为“水线”^[3]。之前的研究已经验证了,充水 PFA 管频散曲线是由空管频散曲线和水线合成的曲线,这说明在水线上的导波模式携带水中的信息较多,更适合流量测量。

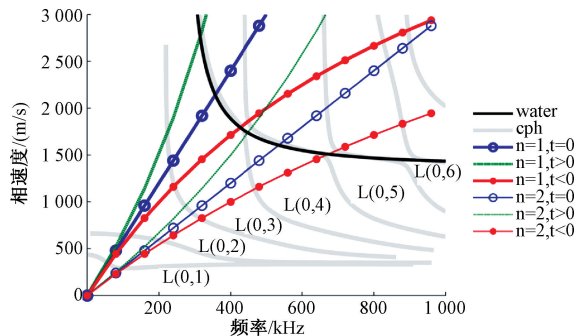


图 1 3 mm PFA 充水管频散曲线和阵列探头频率选择特性线
Fig. 1 Frequency dispersion curve of 3 mm PFA charging tube and frequency selection characteristic curves of array probe

1.2 斜探头和阵列探头模式选择对比

由于导波不同模式的相速度、群速度不同,为了达到良好的导波测量效果,需要激励出单一模式的导波。常用的导波激励方法是斜入射激励,本文提出采用阵列探头进行激励,下面分析两种激励方法的模式选择特性。

1) 斜探头模式选择原理

斜入射方法如图 2 所示。超声波在楔块(均匀介质)中以平面波形式传播,斜入射进薄管壁,管壁中以超声导波形式传播。

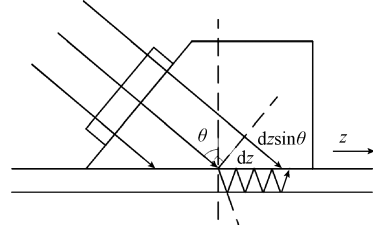


图 2 斜入射原理

Fig. 2 Principle of wedge excitation

设超声在楔块中的声速为 c ,入射角为 θ ,根据相位连续性原理,沿着导波传播方向(z 轴),入射波的相位延迟为:

$$d\varphi = \frac{dz \sin \theta}{c} \cdot \omega \quad (1)$$

其中, ω 为导波的角频率。当 $d\varphi/dz$ 等于导波某一模式的波数时,该模式的导波最强,即:

$$\frac{d\varphi}{dz} = k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_{ph}} \quad (2)$$

此时有:

$$c_{ph} = c / \sin \theta \quad (3)$$

即斜探头的角度和楔块声速决定模式相速度。

2) 阵列探头模式选择原理

阵列探头的模式选择方法如图 3 所示^[16-17]。设在传播方向上有 M 个阵元,间距为 p ,每个阵元的激励经过 t_0 的延时,假设声波在传播的过程中没有能量损失,并且暂时忽略阵元宽度即 $W=0$,根据文献^[17],可推导出接收点信号 $a(t)$ 的频率响应为:

$$A(\omega) = \sum_{i=1}^M e^{j[\omega(t-t_i)-k(z-z_i)]} e^{-j\omega t_0} = \sum_{i=1}^M e^{j[\omega(t-(i-1)t_0)-k(z+z_0-(i-1)p)]} = \frac{\sin[M(kp + \omega t_0)/2]}{\sin[(kp + \omega t_0)/2]} \cdot e^{j[\omega(t-\frac{M-1}{2}t_0)-k(z+z_0-\frac{M-1}{2}p)]} \quad (4)$$

其幅值取得最大值时满足:

$$kp + \omega t_0 = \omega(p/c_{ph} + t_0) = 2n\pi, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$c_{ph} = \frac{\omega p}{2n\pi - \omega t_0}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

令 $p=6$ mm,在图 1 中表示式(5)的关系,图中的 t 对应式(5)中的 t_0 ,即实心圆曲线($t_0<0, n=1$ 或 2)、点状曲

线($t_0 > 0, n = 1$ 或 2)、空心圆直线($t_0 = 0, n = 1$ 或 2)三组线表示阵列激励时频率响应取得最大值的情形,三组线称为阵列探头的频率选择特性线。相速度频散曲线与阵列探头的频率选择特性线相交时,表示导波在此满足阵列探头的强化选择条件,激励效果最好。 t_0 为正或负表示阵列激励沿传播反或正方向的传播增强,使得阵列探头的频率选择特性线上翘或下弯。另外,Geoffrey 在 2020 年论文中提出使用超声相控阵列探头在固定相速度下激励导波的方法^[18],即在间距 p 远小于波长 λ 且 $n = 0$ 时,相速度 c_{ph} 独立于频率而仅依赖于延时 t_0 ,此时可改变 t_0 激励出期望的相速度 c_{ph} 。

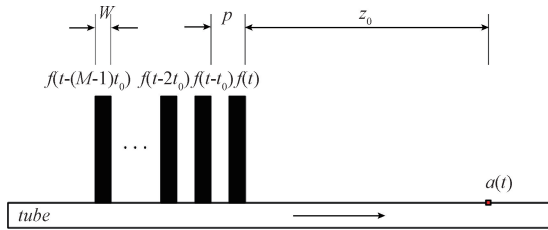


图 3 阵列激励原理

Fig. 3 Principle of array excitation

本文未采用延时,即令 $t_0 = 0$, 对应的特性线是空心圆直线,此时式(5)可简化为:

$$\frac{c_{ph}}{f} = \lambda = \frac{p}{n}, n = 1, 2, \dots \quad (6)$$

即阵元间距为导波波长的整数倍。图 1 中有 $n = 1$ 和 $n = 2$ 的两条特性线,改变间距 p 或取不同的 n 可以获得不同斜率的频率选择特性线,波长即为斜率,改变阵列探头激励频率即可选择不同模态相速度。

2 阵列探头设计

为了实现阵列探头激励导波,必须对其进行设计,以匹配所使用的 PFA 管。期望进行实验的频率范围较大(200 kHz 至 600 kHz),因此选用 Q 值小,带宽大的压电 I-3 型复合陶瓷探头^[19]。

本节通过谐振频率仿真和频率扫描仿真,设计了复合陶瓷尺寸,并制作了不同间距的阵列探头。

I-3 型复合陶瓷模型如图 4(a) 所示,探头阵元长度、宽度、厚度分别用 L 、 W 、 h 表示,连续的陶瓷片中留下带有填充材料的细缝,以减小陶瓷本身宽度方向谐振带来的负面作用,在填充间隙之间的压电陶瓷单元都为方柱状。

2.1 压电陶瓷(阵元)厚度及宽度设计

为确定厚度 h ,对图 4(a) 中的单个压电陶瓷单元进行 2D 有限元仿真分析。定制的陶瓷柱单元宽度为

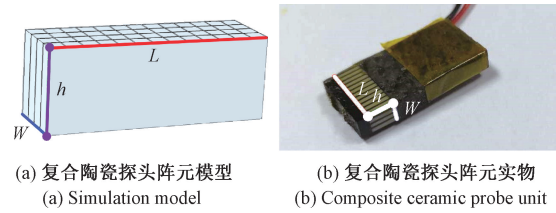


图 4 复合陶瓷探头阵元

Fig. 4 Composite ceramic probe unit and its simulation model

0.75 mm,仿真时将此值固定。仿真模型为 2D 矩形,指定材料为 PZT-5H,在矩形上下电极以频率 400 kHz、幅值 1 V 的交流信号作为激励,矩形厚度在 1~14 mm 范围变化,记录矩形上表面厚度方向位移的 RMS 值,当其最大时得到厚度约 3.7 mm。3 mm PFA 管参数如表 1 所示。

表 1 3 mm PFA 管参数

Table 1 Parameters of 3 mm PFA tube

内径	外径	密度	纵波速度	横波速度
mm	mm	(kg/m ³)	(m/s)	(m/s)
1.5	3.2	2 200	1 230	370

为确定阵元宽度 W ,对 3 mm PFA 管上不同阵列宽度激励下的接收波形情况进行有限元仿真,如图 5(a) 所示,仿真模型为 2D 轴对称 3 mm PFA 圆管,长 100 mm。在管上设置可变线宽以模拟不同宽度的探头阵元,施加 15 个周期汉明窗调制的正弦变化的压力作为径向激励,扫描激励频率范围 300~550 kHz,在距离探头 30 mm 处进行接收,接收波峰值与探头宽度、激励频率之间的关系如图 5(b) 所示。

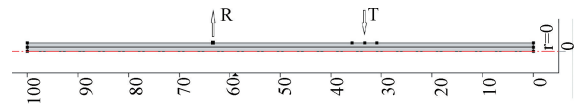
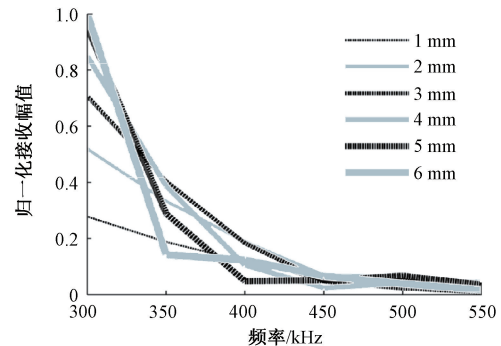
(a) 3 mm PFA 管仿真模型
(a) Simulation model of 3 mm PFA tube(b) 接收幅值与探头阵元宽度、
激励频率之间的关系(b) Relationship between received signal amplitude and
excitation frequency of varying width of array probe unit

图 5 探头阵元宽度仿真

Fig. 5 Simulation of width selection of array probe unit

可以看到,在频率 350~420 kHz 之间 3 mm 宽的探头接收信号幅值最大。因此,可选择 3 mm 作为探头阵元宽度,幅值较大且可覆盖期望的频率范围。

2.2 探头阵元的扫频分析

由于有填充间隙,陶瓷柱单元宽度可视为 0.8 mm,根据 2.1 节,最终定制生产的探头阵元的尺寸调整为厚度 4 mm,宽度 3.2 mm,长度选择 10.4 mm(宽度、长度均取陶瓷柱单元宽度的倍数,厚度从 3.7 mm 调整至 4 mm)。探头实物如图 4(b) 所示。

使用阻抗分析仪对探头阵元进行扫频分析,得到探头的主要谐振频率点如表 2 所示,符合宽带要求。

表 2 扫频实验得到的探头阵元主要谐振频率
Table 2 Main resonance frequencies of the probe unit by frequency scanning

编号	谐振频率/kHz
1	220.0
2	302.4
3	398.5
4	492.7

2.3 阵列间距设计

由于管径小,截止频率高,无法在 220 kHz 下激励出导波。选择分析 302.4 kHz 和 492.7 kHz 下的相速度,在“水线”上找到对应的相速度分别为 2 634 m/s 和 1 729 m/s,计算对应波长为 8.7 mm 和 3.5 mm。由式(6)知,阵列叠加效果最好时,阵列间距为波长的整数倍。并且在“水线”与阵列探头频率选择特性线交点处进行激励效果最好。

综合考虑探头特性以及阵列制作限制、实验条件等,最终制作阵元个数为 6,间距分别为 6 mm、7.2 mm 及 8.1 mm 的梳状探头夹,再用探头架将阵列探头固定在 PFA 管上,以保证探头和 PFA 管的紧密接触,组装示意图如图 6 所示。同时,将 3 种探头的特性线(九条斜线)画在了图 7 中,对于同种间距,斜率由大到小分别对应 $n=1,2,3$ 时的 3 种情形。

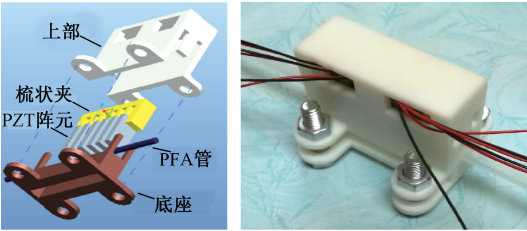


图 6 探头组装示意图
Fig. 6 Diagram of probe assembly

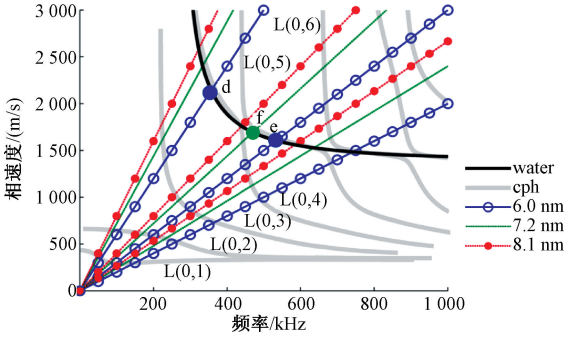


图 7 相速度频散曲线与不同间距阵列探头频率选择特性线
Fig. 7 Phase velocity dispersion curves and frequency selection characteristic curves of array probe with different pitches

3 实验验证

3.1 频率扫描实验

由于实际材料的影响,使得探头有多个谐振频率,PFA 含水管也有多个导波模式,因此,首先用扫频方法甄选阵列激励接收效果最佳的工作频率,考虑到探头谐振频率,重点关注水线上的模式 L(0,4) 和 L(0,5)。

在 3 mm PFA 管做静水扫频实验,使用不同的阵列间距分别进行收发实验,激励使用 15 周期汉明窗调制的正弦波,得到扫频结果如图 8(a)~(c) 所示。其中,T 表示发送,R 表示接收,如“6T6R”表示激励探头的 6 个阵元激励、接收探头的 6 个阵元接收,“T6-R1”表示激励探头的 6 号阵元激励、接收探头的 1 号阵元接收。可以看到,阵列探头可以明显提高接收信号幅值,但图 8(b) 8.1 mm 间距探头在相对高频段没有出现阵列探头的叠加增强效果。6T6R、6T1R、T1-R1 分别对应图 8(a)、(b)、(c) 中幅值最大处从大到小的三条曲线。各频率下的接收波形幅值如表 3 所示。

表 3 3 mm PFA 管阵列扫频实验结果
Table 3 Results of frequency scanning experiment of 3 mm PFA tube with array excitation

6 mm 阵列间距			7.2 mm 阵列间距			8.1 mm 阵列间距		
交点 /kHz	实测 /kHz	幅值 /digit	交点 /kHz	实测 /kHz	幅值 /digit	交点 /kHz	实测 /kHz	幅值 /digit
367	334	339 *	341	304	606	329	311	573
542	495	815 **	480	456	886 *	436	—	—

表中“交点”表示图 7 中“水线”与阵列探头频率选择特性线交点,“*”表示交点和实测谐振频率重合度较好,可进行流量测量,“**”表示重合度有一定差距,但流量测量实验中效果较好,“—”表示结果不可靠。

3.2 流量测量实验

根据3.1节的扫频实验结果,对于3种间距的探头,分别以实测幅值极大值点附近的频率作为激励频率进行流量测量实验。

最终,在6 mm探头334 kHz和478 kHz以及7.2 mm探头456 kHz激励进行流量测量,并得到了可靠的结果,分别对应图7中的d、e、f三个模态选择点,其时差-流速曲线如图8(d)~(f)所示,每个流量数据点都进行了多次测量,并分别采用了峰值相关二次插值法和峰值相关正弦拟合法计算时差,二者拟合结果接近。图8(d)二次插值法拟合结果斜率略大,图8(e)、(f)正弦拟合法拟合结果率略大。均值和标准差画在了图中,且图中有拟合函数和相关度的显示。实验结果显示时差-流速的线性度都大于0.99,其中图8(e)6 mm探头478 kHz激励的标准差更小、测量灵敏度更高,除去流速最大的测量点(7.65 m/s),其余的测量数据(测量范围0~6.70 m/s)均在 ± 0.22 m/s误差限以内。对于8.1 mm探头,在实际测量中得到的结果较差,未得到有效的时差-流速线性关系。对于实验结果的分析如下。

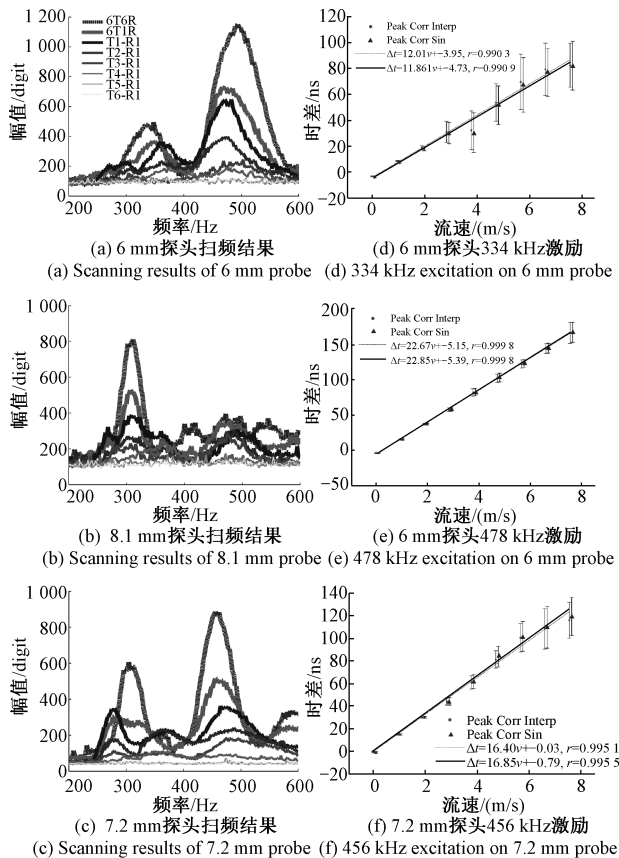


图8 扫频及流量测量结果

Fig. 8 Results of frequency scanning and flow measurement experiments

从扫频实验结果可看出,6 mm探头和7.2 mm探头都得到两个幅值较大的峰,对应到图7中,分别位于 $L(0,4)$ 和 $L(0,5)$ 模态;而8.1 mm探头特性线与水线的一个交点($n=2$)位于 $L(0,4)$ 和 $L(0,5)$ 模态之间,会出现两种模态的相互抑制,另一个交点($n=3$)偏离探头谐振频率(492.7 kHz)较远,因此只得到311 kHz一处较明显的峰,而此峰有些偏离水线不利于流量测量。从图7中可以看到,d点位于 $L(0,4)$ 模态,e点、f点位于 $L(0,5)$ 模态,对比之下, $L(0,5)$ 模态斜率更大,标准差更小。

综上,采用阵列探头激励对3 mm PFA管进行流量测量,若想得到较理想的流量测量结果需满足1)阵列探头频率选择特性线与水线交点位于 $L(0,5)$ 模态,2)在探头谐振频率附近,结合扫频实验选择最佳激励频率。

一般金属管外卡式超声导波流量测量较插入式超声流量测量精度差,而PFA树脂细管上的导波流量测量信号弱、测量难度大,精度更差一些,但仍有生产管理方面的需求。最新发布的3 mm PFA管超声导波流量计产品的量程范围是0~0.5 L/min (4.71 m/s),误差限为 ± 0.15 m/s;6 mm PFA管超声导波流量计的量程范围可达0~2.0 L/min (2.30 m/s),流量在0.8 L/min以上精度可达2%。本文使用3D打印阵列探头架和定制的探头阵列组装成阵列探头,对3 mm PFA管进行流量测量,与上述3 mm PFA管流量计产品中使用的探头结构不同,仅对比流量测量性能,本文的实验结果虽然误差限较大,且需要经过多次测量取平均,但是流量(流速)测量范围更大。

由于不同模态不同频率下导波在管壁和水中的能量分布不同,且管壁上的导波传播不产生时差,因此导致时差-流速测量曲线斜率比理论值低,且在不同间距、不同频率下也有一定差异,实际测量应用中需要根据环境条件进行标定。

4 结 论

本文结合了阵列探头导波激励和PFA管超声导波流量测量两大研究方向,通过仿真和实验探究了探头阵元的宽度、厚度以及阵列间距等参数对探头激励效果的影响,并根据工作频率范围设计了对应参数的阵列探头。最后,结合阵列探头频率选择特性线与水线交点,根据扫频实验确定激励频率,在3 mm PFA管上应用阵列探头进行了超声导波流量测量实验。结果表

明,阵列探头可增强信号幅值,与之前的圆锥楔块探头相比测量灵敏度有较大提高^[3],且针对 3 mm PFA 管, L(0,5) 模态结果优于 L(0,4) 模态。本文所研究的基于阵列探头的 3 mm PFA 管流量测量系统的流速测量范围为 0~6.70 m/s,误差限为 ± 0.22 m/s,在测量精度上还需进一步提高。

致谢

本课题研究承蒙日本东京计装株式会社资助,特此致谢。

参考文献

- [1] SATO H, LEBEDEV M, AKEDO J. Theoretical and experimental investigation of guide wave flow meter[C]. proceedings of the Proc Symp Ultrason Electron, 2006, 46(7B):363-364.
- [2] SATO H, LEBEDEV M, AKEDO J. Theoretical investigation of guide wave flowmeter [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(7S): 4521.
- [3] LI X, XIAO X F, CAO L. Excitation condition analysis of guided wave on PFA tubes for ultrasonic flow meter[J]. Ultrasonics, 2016(72):134-142.
- [4] HUANG J, CAO L. Parameters tuning of TFM and defect detection of CFRP sheet based on ultrasonic array probe[C]. 2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2018;879-883.
- [5] 刘文婧, 秦华军, 王建国, 等. 基于超声相控阵的全聚焦三维成像[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 26-28, 35.
LIU W J, QIN H J, WANG J G, et al. Total focusing 3D imaging based on ultrasonic phased array[J]. Sensors and Microsystems, 2020, 39(12): 26-28, 35.
- [6] 张继敏, 周晖, 刘奎, 等. 大厚度复合材料结构的超声相控阵检测成像与缺陷定量表征[J]. 无损检测, 2017, 39(3):35-39.
ZHANG J M, ZHOU H, LIU K, et al. Imaging and quantitative characterization of defects by phased array ultrasonic detection in big-thickness composite structure[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(3):35-39.
- [7] ZHOU Z, PENG D, YANG L I, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10):1.
- [8] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, application and challenge of ultrasonic guided wave testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1713-1735.
- [9] 郑跃滨, 武湛君, 雷振坤, 等. 基于超声导波的航空航天结构损伤诊断成像技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(18):24-43.
ZHENG Y B, WU ZH J, LEI ZH K, et al. Research progress of damage diagnosis imaging technology for aerospace structures based on ultrasonic guided wave[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(18): 24-43.
- [10] KANNAJOSYULA H, LISSENDEN C J, ROSE J L. Analysis of annular phased array transducers for ultrasonic guided wave mode control[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 22(8):085019.
- [11] 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):127-35.
- [12] RAJAGOPALANA J, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V. A phase reconstruction algorithm for Lamb wave based structural health monitoring of anisotropic multilayered composite plates[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(119): 872-878.
- [13] 罗斯. 固体中的超声波[M]. 北京:科学出版社, 2004.
Rose. Ultrasound in solids[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [14] LOWE M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, 42(4):525-542.
- [15] PAVLAKOVIC B, LOWE M, ALLEYNE D, et al. Disperse: A general purpose program for creating dispersion curves[M]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Springer, 1997: 185-192.
- [16] ROSE J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(3):273-282.

- [17] LI J, ROSE J L. Implementing guided wave mode control by use of a phased transducer array [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2001, 48(3): 761-768.
- [18] GEOFFREY V, PIERRE B. An ultrasonic guided wave excitation method at constant phase velocity using ultrasonic phased array probes[J]. Ultrasonics, 2020(102):106039.
- [19] 党长久, 李明轩. 1-3 型压电复合材料[J]. 应用声学, 1995, 14(1): 2-7.
- DANG CH J, LI M X. 1-3 piezoelectric composite materials[J]. Applied Acoustics, 1995, 14(1): 2-7.

作者简介



董宇光, 2019 年于北京理工大学获得学士学位, 现为清华大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器检测和信号处理。

E-mail: dyg19@mails.tsinghua.edu.cn

Dong Yuguang received his B.Sc. degree

from Beijing Institute of Technology in 2019. He is currently a master student at Tsinghua University. His main research interests include sensor detection and signal processing.



曹丽 (通信作者), 1987 年于日本东京工业大学获得学士学位, 1989 年和 1992 年于东京工业大学分别获得硕士和博士学位, 现为清华大学副教授, 主要研究方向为传感器与检测技术、超声测量。

E-mail: caoli@tsinghua.edu.cn

Cao Li (Corresponding author) received her B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Tokyo Institute of Technology, Japan, in 1987, 1989, and 1992, respectively. She is currently an associate professor at Tsinghua University. Her main research interests include sensor and measurement technology, and ultrasonic measurement.