

Simulation Research of an Aligned Array MEMS Vector Acoustic Sensor in Above-Ground Marker of Pipeline *

LIU Mengran^{1,2}, ZHANG Guojun^{1,2*}, JIAN Zeming^{1,2}, LIU Hong¹, SONG Xiaopeng¹, ZHANG Wendong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Science and Technology on Electronic Test and Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the present situation, the pipe marking difficulty and poor measurement precision, a new-type monolithic integrated aligned array MEMS vector acoustic sensor has been put forward. The sensor overcomes the deficiency for using the existing sound vector sensor to judge the signal position in the oil and gas pipeline detector, and eliminates the port/starboard blur problem. By using ANSYS software for simulation aligned array vector acoustic sensor structure, the results show that the sensitivity of the aligned array vector acoustic sensor is 2.05 mV/Pa, the first-order modal is 438 Hz. The natural frequency is 438 Hz. Finally, the Orientation Angle formula of the aligned array vector acoustic sensor azimuth estimation in the pipeline internal detector is given.

Key words: internal detector; aligned array vector acoustic sensor; ANSYS simulation; DOA estimation

EEACC:2575D

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2014.02.007

一种用于管道地面标记的阵列式 MEMS 矢量声传感器仿真研究 *

刘梦然^{1,2}, 张国军^{1,2*}, 简泽明^{1,2}, 刘宏¹, 宋小鹏¹, 张文栋^{1,2}

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对目前对管道内检测器标记难和测量精度差的现状, 提出了一种新型单片集成阵列式矢量声传感器。克服了现有矢量声传感器在油气管道内检测器方位估计中判断信号方位的不足, 消除了左右舷模糊的问题。通过用 ANSYS 软件对阵列式矢量声传感器结构进行仿真, 得出该阵列式矢量声传感器的灵敏度为 2.05 mV/Pa, 一阶模态为 438 Hz, 固有频率为 438 Hz。最后根据分析得出阵列式矢量声传感器在管道内检测器方位估计中的定位角度公式。

关键词: 内检测器; 阵列式矢量声传感器; ANSYS 仿真; 方位估计

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)02-0184-06

管道是油气资源最主要的运输方式之一, 它具有安全、平稳、经济等优势^[1]。为了保证管道正常安全运行, 需要对管道进行检测。管道内检测技术是目前最为广泛和最为有效的管道检测方法。为了提高内检测器检测的精确度, 需要对内检测器进行地面标记。目前已研制出涡流法、磁学方法和声学方法等不同原理的地面标记器^[2-4], 并且这些标记器在管道检测方面取得了较好的效果。然而当今管道正向着大口径、壁厚、深埋的方向发展, 基于声检测原理的传感器成为了技术发展的重点^[5-6]。

内检测器借助于管道内流体介质的推动力下在管道内运行, 在运行的过程中主要会产生两种声信

号: 一种是内检测器与管道内壁摩擦产生的摩擦声信号, 另一种是内检测器与管道焊缝的撞击声信号。大量实地实验表明, 摩擦声信号的频率集中在 150 Hz ~ 350 Hz 之间, 而撞击声信号则集中在几十赫兹之间^[7]。当内检测器在管道中运行时, 它与管道内壁摩擦和焊缝碰撞产生的声信号会通过土壤介质向四周传播。声波在土壤中的传播随距离呈指数衰减^[8-9]。由于土壤的衰减作用, 信号会变的非常微弱, 传统的利用振动声信号检测原理的声传感器不具有矢量性, 利用声传感器阵列来检测内检测器方位, 这样由于声传感器的一致性, 对内检测器的方位估计精度不高; 或者具有矢量性的声传感器在管道地面标记中也

项目来源: 国家 863 计划项目 (2011AA040404); 国家自然科学基金项目 (61127008, 51205374); 山西省青年科技研究基金项目 (2012021013-3)

收稿日期: 2013-08-18 修改日期: 2014-02-05

存在左右舷模糊(只能检测范围信号在零度到 90° 之间的角度位置, 而无法判别 90° 到 180° 之间的角度情况)的问题, 本文介绍了一种高灵敏度新型阵列式矢量声传感器, 该阵列式矢量声传感器克服了现有矢量传感器在方位估计中, 特别是应用在油气管道内检测器地面标定中无法判断信号方位的不足, 消除了左右舷模糊的问题。

1 阵列式矢量声传感器结构设计理论与分析

MEMS 声矢量传感器是 MEMS 技术、仿生学原理、压阻原理等多种先进技术相融合的产物。其在水介质中的应用已经取得了突破性的进展, 其工作原理与制作方法张文栋等人在相关文献(如参考文献[10])中已做了详细的阐述, 应用领域也从水中扩展到陆地, 其前景十分广阔。其主要应用于土壤环境。因此, 针对土壤这种复杂的介质, 为了克服其左右舷模糊的问题, 更精确的定位土壤中的声源, 设计出了阵列式矢量声传感器结构。

1.1 结构设计

本文所设计的单片集成阵列式矢量声传感器结构如图 1, 主要包括以 SOI 片为加工材料, 采用标准压阻式硅微机械工艺加工成的四梁臂硅微结构及固定于四梁中心的微型柱状体(纤毛), 一个四梁臂硅微结构和四梁中心的微型柱状体组成一个敏感部件, 用两个这样的敏感部件集成一个阵列式矢量声传感器结构。为了使传感器中两个敏感部件具有良好的一致性, 两个敏感部件所有梁的厚度为 10 μm、长度为 1 000 μm、宽度为 120 μm, 微型柱状体的半径为 100 μm、长度为 5 000 μm。两个敏感部件的 4 个悬臂梁的排布方式不同, 一种是“十”字型, 另一种是“X”字型(“十”字型逆时针旋转 45°)。每个敏感部件的四梁臂上通过扩散工艺分别加工有八个阻值相等的应变压敏电阻 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ 和 $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}$, 传感器上的应变压敏电阻的分布连接示意图如图 2 所示, 其中

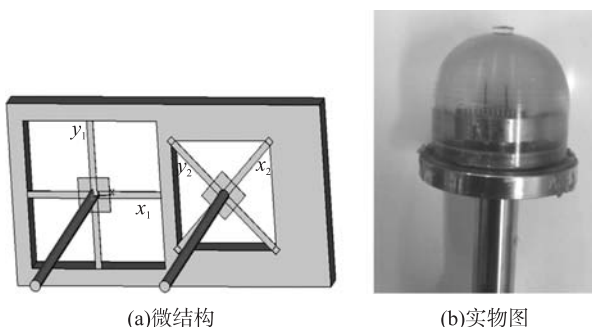


图 1 传感器的结构示意图

R_1, R_2, R_3, R_4 连接成第 1 个惠斯通电桥, R_5, R_6, R_7, R_8 连接成第 2 个惠斯通电桥, $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$ 连接成第 3 个惠斯通电桥, $R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}$ 连接成第 4 个惠斯通电桥, 构成检测电路, 如图 3 所示。

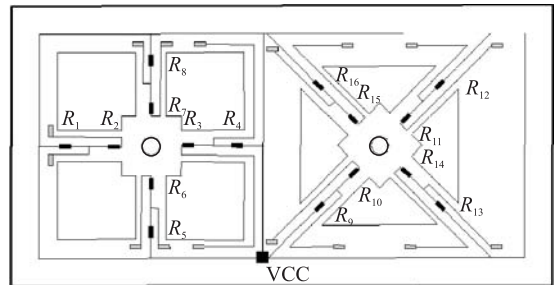


图 2 传感器上的应变压敏电阻的分布连接示意图

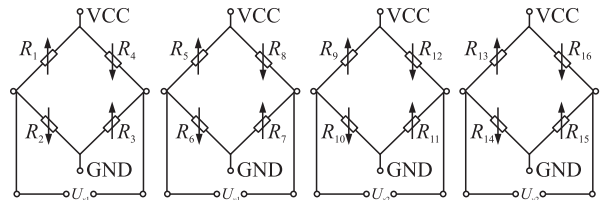


图 3 传感器上的应变压敏电阻连接构成的惠斯通电桥电路图

1.2 理论分析^[10-11]

根据理论知识与推导, 单根悬臂梁在弯矩 $M(x)$ 和水平力 F_H 共同作用下的任意一点 x 的应力 $\sigma(x)$ 为:

$$\sigma(x) = \pm \frac{L^2 + 3aL - 3x(a+L)}{3bt^2(L^2 + 3aL + 3a^2)} M \pm \frac{F_H}{bt} \quad (1)$$

在无应力作用下, (以第 1 个电桥为例) 电桥的输出电压可表示为:

$$V_{out} = \frac{(R_1 R_3) - (R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{in} = 0 \quad (2)$$

此时, 电桥平衡。当有应力作用时, 轴上的压敏电阻阻值发生变化, 电桥的输出电压表示为:

$$V_{out} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4)} V_{in} \quad (3)$$

此时, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R, \Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$ 。

式(3)能够近似表示为:

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_{in} \quad (4)$$

对于 P 型压敏电阻有:

$$\Delta R/R = 71.8\sigma_1 \times 10^{-11} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)则有:

$$V_{out} = 71.8 \times 10^{-11} \times \sigma_1 \times V_{in} \quad (6)$$

其中: L 为悬臂梁的长度 (μm), b 为悬臂梁的宽度

(μm), t 为悬臂梁的厚度 (μm), a 为中心连接体的半宽长 (μm), σ_1 为敏感单元上对应的 X 方向或 Y 方向上最大应力, V_{in} 为电桥的输入电压。

2 传感器结构有限元仿真分析

采用有限元分析软件 ANSYS11.0 建立阵列微结构的有限元模型, 然后分别进行静态分析、模态分析以及谐响应分析。分析过程中采用三维四面体单元 SOLID92。所需材料属性如表 1。

表 1 材料属性

材料	弹性模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
硅微结构	1.65×10^{11}	0.278	2 330
柱状体	7.4×10^{10}	0.17	2 320

2.1 静力分析及传感器灵敏度

在阵列结构模型的边框及背面施加全约束, 即在 U_x, U_y, U_z 位移都约束为 0; 同时沿微柱体 y_1 正方向加 1 Pa 载荷, 通过定义路径, 得到阵列微结构 y_1 轴上的应力曲线, 如图 4 所示。

从图 4 可知梁上的应力基本上是线性分布的且梁两端上的应力最大, 但是梁的根部有跳动, 在布置电阻时, 应该避开该区域。因此梁上的压敏电阻应布置在距根部两端 130 μm 的中心位置处^[12-14]。

传感器敏感微结构的灵敏度可以表示为微结构

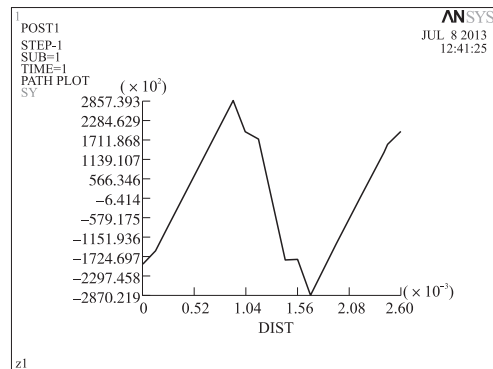


图 4 路径分析图

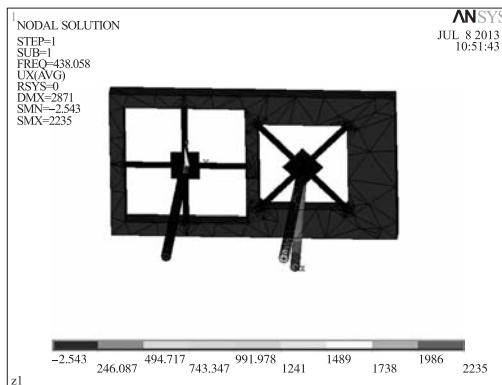
的输出电压 V_{out} 与中心柱状体上所受载荷 F 的比值, 由式(6)可得敏感单元 X 轴和 Y 轴的灵敏度可表示为:

$$S_{Ax} = S_{Ay} = V_{out} / F \quad (7)$$

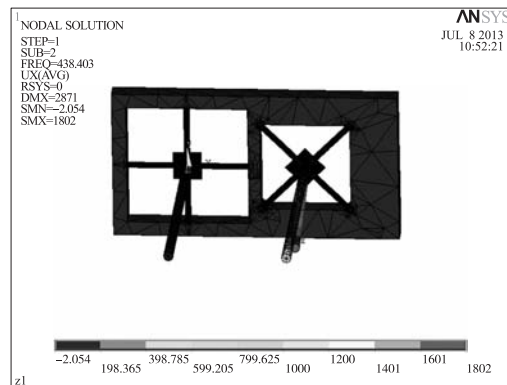
由图 4 可知, 敏感单元在 1 Pa 的作用力下, 传感器 y_1 轴向最大应力为 $\sigma_1 = 285\ 739.3$ Pa, 电桥的输入电压 $V_{in} = 10$ V, 代入式(6)和式(7)可得敏感单元 X 轴和 Y 轴的灵敏度为 2.05 mV/Pa。

2.2 模态分析

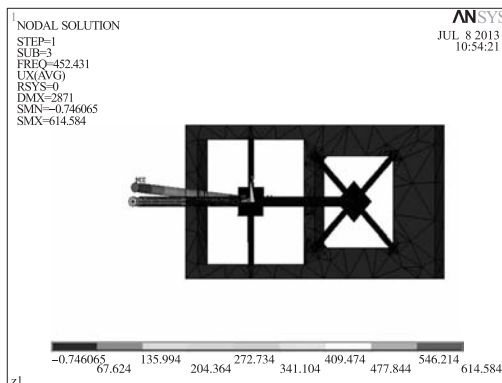
模态分析一般是用于确定设计中结构的振动特性, 可以通过模态分析确定各个敏感部件的固有频率, 如图 5 所示; 阵列式矢量声传感器四阶模态如表 2 所示。



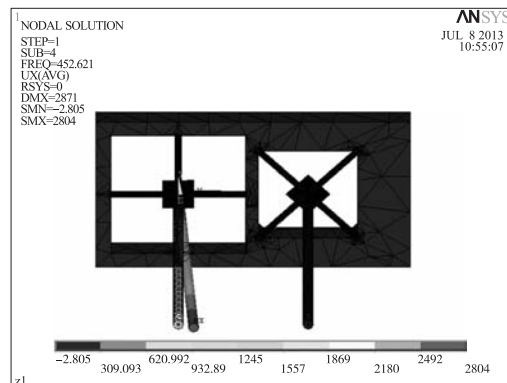
(a)一阶模态



(b)二阶模态



(c)三阶模态



(d)四阶模态

图 5 模态分析

表 2 阵列式矢量声传感器结构的四阶模态

模态	频率/Hz	模态	频率/Hz
一阶模态	438	三阶模态	452
二阶模态	438	四阶模态	452

2.3 谐响应分析

谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的载荷时的稳态响应, 谐响应分析可以预知阵列微结构的动态特性。因此, 通过谐响应分析可以克服阵列微结构的共振。图 6 为仿真阵列微结构的谐响应分析结果, 横坐标为频率, 纵坐标为 y 方向上的位移。由图 6 中结果可以看出阵列结构的谐振频率为 438 Hz, 这与前面的模态分析对应结果是一致的。

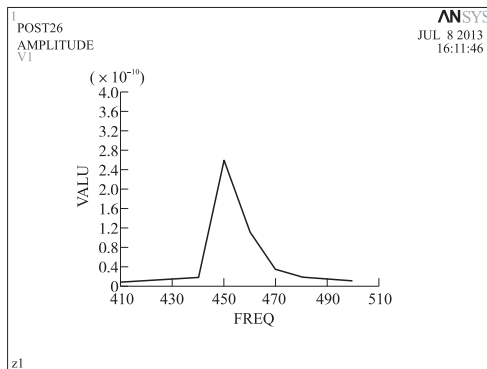


图 6 谐响应分析结果

3 阵列式矢量声传感器在管道地面标记中的应用

3.1 MEMS 矢量声传感器(一个敏感部件)定向原理

MEMS 矢量声传感器的定向测量模型如图 7 所示。图 7 中, s 为声源所在位置。角度 φ 为声信号入射方向的俯仰角, θ 为声信号入射方向的水平角^[15]。在声矢量场中任一点的都可以分解为 4 个分量: 介质质点振速分量 ($v_x(r, t)$ 、 $v_y(r, t)$ 、 $v_z(r, t)$) 及声压路 ($p(r, t)$)。矢量声传感器可以同步、共点、独立的测量声场中任一点得上述 4 个分量。以 $v(r, t)$ 表示质点振速, 则由图 7 可得:

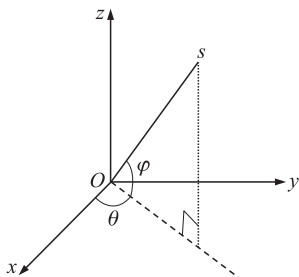


图 7 MEMS 矢量声传感器的定向模型

$$\begin{cases} p(r, t) = v(r, t) \\ v_x(r, t) = v(r, t) \cos\theta \sin\varphi \\ v_y(r, t) = v(r, t) \sin\theta \sin\varphi \\ v_z(r, t) = v(r, t) \cos\varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中, 入射声波的方位角 θ 的范围为 $[0, 2\pi]$, 入射声波的俯仰角 φ 的范围为 $[0, \pi]$ 。由式(7)可知, 测得质点振速 v_x 、 v_y 、 v_z , 即可算出其声源的水平角(式(8))与俯仰角(式(9))。

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}\right) \quad (9)$$

矢量声传感器的测量信号为电压分量, 而电压分量与上述振速分量成正比, 因此, 只要测得声传感器的电压分量及可得到其水平角与俯仰角。在管道内检测器定位时, 只需精确定位其水平角度, 不涉及俯仰角的计算。

由于声传感器的电压分量都大于零, 所以根据式(8)计算出的声源水平角 θ 的取值范围是: $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 。当计算出的声源水平角为 θ 时, 实际上声源的方位角为 θ 或 $180^\circ - \theta$, 即当声源关于 y 轴对称时, 根据式(8)测得的 θ 值是一样的, (本文只考虑 0° 到 180° 的定位)。则 MEMS 矢量声传感器存在左右旋模糊的问题。所以, 设计出了阵列式矢量声传感器结构, 克服左右旋模糊的问题, 精确的定位声源。

3.2 基于阵列式矢量声传感器的管道地面标记

内检测器在管道中运行时, 会发出内检测器与管道内壁的摩擦声音和与管道焊缝的冲击声音, 阵列式矢量声传感器能够检测到这两种声音信号, 并且这两种声音信号经敏感部件形成电压信号输出, 从而可对内检测器进行方位估计。阵列结构可以建立 $V_{x1} - V_{y1}$ 和 $V_{x2} - V_{y2}$ 两个坐标系, 如图 8 所示; 由于管道内检测器到传感器的距离远大于两个敏感部件中心的距离, 两个敏感部件中心可看作在同一原点 O , 建立参考坐标系 $x - y$, 其中原点 O 与 O_1 重合, x 轴与 V_{x1} 重合, y 轴与 V_{y1} 重合, 参考坐标系 $x - y$ 被划

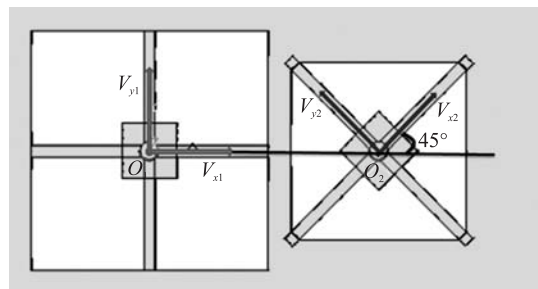


图 8 阵列结构的坐标系

分出4个区域。在布置阵列式矢量声传感器结构时,以地面为 $x-y$ 平面建立直角坐标系, x 轴平行于管道,阵列定向示意图如图9所示。

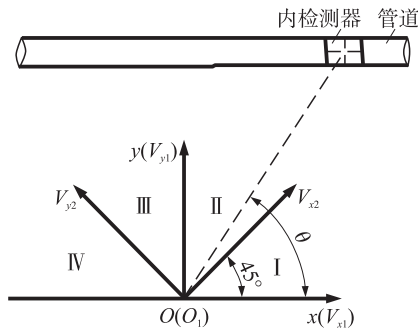
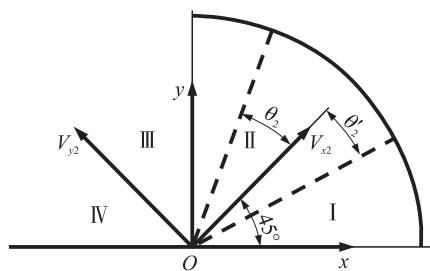


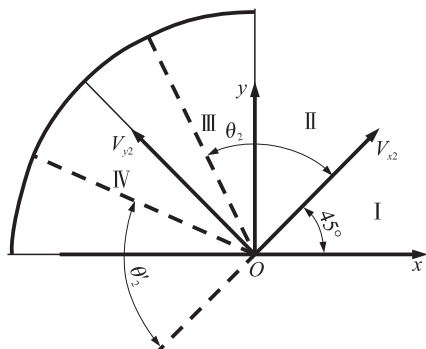
图9 阵列定向示意图

以参考坐标系 $x-y$ ($x-y$ 平面) 为基准面来定位管道内检测器的方位角度 θ 。若每个敏感部件经惠斯通电桥输出的电压信号有 V_{x1}, V_{y1} 和 V_{x2}, V_{y2} , 根据式(8)计算出第1个敏感部件计算的角度 $\theta_1 = \arctan \frac{V_{y1}}{V_{x1}}$ ($0^\circ < \theta_1 \leq 90^\circ$), 则 $\theta = \theta_1$ 或 $\theta = 180^\circ - \theta_1$ (左右舷模糊), 同时再根据第2个敏感部件计算出的角度 $\theta_2 = \arctan \frac{V_{y2}}{V_{x2}}$ ($0^\circ < \theta_2 \leq 90^\circ$) 的值, 可判断出声源是在 y 轴的左边还是右边 (即左舷或右舷) 从而判断出管道内检测器方位角度 θ 的具体值。

判断过程如下: 当内检测器在 y 轴的右边 (右舷) 运行时, 如图10(a)所示, 第2个敏感部件测得的 θ_2 范围在 0° 到 45° 之间 (理论上, 当在 I 区域时,



(a) 声源在右舷时



(b) 声源在左舷时

图10 θ_2 的范围

$0^\circ < \theta_1 \leq 45^\circ$, 并且 $\theta_2 = 45^\circ - \theta_1$; 当在 II 区域时, $45^\circ < \theta_1 < 90^\circ$, 并且 $\theta_2 = \theta_1 - 45^\circ$, 在这两种情况下都有 $0^\circ < \theta_2 < 45^\circ$, 且此时 $\theta = \theta_1$; 同样地, 当内检测器在 y 轴的左边 (左舷) 运行时, 如图10(b)所示, θ_2 在 45° 到 90° 之间 (理论上, 当在 III 区域时, $45^\circ < \theta_1 < 90^\circ$, 并且 $\theta_2 = 135^\circ - \theta_1$; 当在 IV 区域时, $0^\circ < \theta_1 \leq 45^\circ$, 并且 $\theta_2 = 45^\circ + \theta_1$, 在这两种情况下都有 $45^\circ < \theta_2 \leq 90^\circ$), 且此时 $\theta = 180^\circ - \theta_1$ 。则有如下结论: 当 $0^\circ \leq \theta_2 < 45^\circ$ 时管道内检测器的方位角度 $\theta = \theta_1$; 当 $\theta_2 = 45^\circ$ 时管道内检测器的方位角度 $\theta = 90^\circ$; 当 $45^\circ < \theta_2 \leq 90^\circ$ 时管道内检测器的方位角度 $\theta = 180^\circ - \theta_1$ 。从而得出基于阵列结构的管道内检测器的定位角度公式, 如表3所示。

表3 管道内检测器的方位估计角度

θ_1	$(0^\circ \quad 180^\circ)$		
θ_2	$(0^\circ \quad 45^\circ)$	45°	$(45^\circ \quad 90^\circ)$
θ	θ_1	90°	$180^\circ - \theta_1$

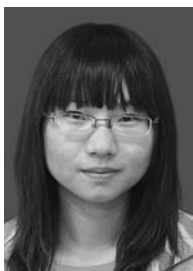
4 结论

本文针对目前管道内检测器所发声信号经过土壤介质衰减严重, 从而标记困难和不准确的问题, 以及为了克服现有矢量声传感器在管道内检测方位估计中存在的左右舷模糊的问题, 提出了一种新型阵列式矢量声传感器。通过 ANSYS 仿真, 得出该阵列式矢量声传感器结构的灵敏度为 2.05 mV/Pa , 一阶模态为 438 Hz , 固有频率分别为 438 Hz , 这与一阶模态是一致的。在管道定位的过程中分别得出两个敏感部件的角度 θ_1 和 θ_2 , 经过分析和推论, 可以准确得到内检测器的方位, 从而消除了左右舷模糊的问题, 并且给出了具体的定位角度公式。

参考文献:

- [1] 郭敏智, 杨嘉瑜. 当代管道输油技术的现状与发展趋势[J]. 中国石化, 2004, (7): 16-20.
- [2] 高福庆. 管道内检测技术应用及发展[J]. 石油规划设计, 2000, 11(1): 40-41.
- [3] 沈功田, 井为科, 左延田. 埋地管道无损检测技术[J]. 无损检测, 2006, 28(3): 137-141.
- [4] Bruno A C, Schiffini R. New magnetic techniques for inspection and metal-loss assessment of oil pipelines[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001. 226-230.
- [5] 崔尧尧. 基于声传感器阵列的管道内检测器追踪定位系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学. 2011.
- [6] 吴晓. 基于声传感器阵列的油气管道内检测器地面标记跟踪技术研究[D]. 天津: 天津大学. 2010.
- [7] 吴晓, 靳世久, 李一博. 基于地震波传感器阵列的管道地面标记系统[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(6): 554.

- [8] 穆林范,惠珍宁,显宗. 黄土层内的声波传播衰减[J]. 应用声学,1995(1):19-22.
- [9] 葛晓洋,张国军,杜春晖等. 一种用于管道地面标记的 MEMS 仿生矢量传感器[J]. 压电与声光,2012,34(6):882-885.
- [10] 陈尚. 硅微仿生矢量水声传感器研究[D]. 太原:中北大学,2008.
- [11] 李振,张国军,薛晨阳,等. MEMS 仿生矢量水听器封装结构的设计与研究[J]. 传感技术学报,2013,26(1):25-30.
- [12] 许姣,张国军,石归雄,等. 纤毛式矢量水听器新型封装结构的研究[J]. 传感技术学报,2011,24(4):519-520.
- [13] 刘林仙,张国军,许姣,等. 双 T 型 MEMS 仿生矢量水听器的设计与测试[J]. 振动与冲击,2013,32(2):130-131.
- [14] 许姣,李俊,张国军,等. 一种新型 MEMS 矢量水听器的设计[J]. 压电与声光,2012,34(1):90-91.
- [15] 邢建军. 矢量水听器测向技术的研究[D]. 西安:西北工业大学,2005:18-23.



刘梦然(1991-),女,湖北省随州市人,中北大学硕士研究生,主要从事微纳器件研究及传感器相关信号处理,liumengran1991@163.com;



张国军(1977-),男,副教授,2001年7月毕业于华北工学院自动控制系并留校任教,同年9月被派往清华大学微电子系进修微电子专业。2003年考取中北大学精密仪器及机械专业研究生,2004.7~2006.7在中国科学院声学研究所做有关穿孔板结构非线性声学方面的研究工作,2012年,在西北工业大学攻读博士;



简泽明(1989-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事微纳器件研究及传感器结构设计,精密仪器及机械专业,jianzemingx@163.com。