

# 一种气隙谐振型气介超声换能器

马志敏<sup>1</sup>, 贾红<sup>2</sup>

(1. 武汉水利电力大学, 武汉 430072; 2. 武汉联合置业公司, 武汉 430072)

**摘要:** 本文提出了一种新型的气隙谐振型气介式超声换能器, 它是利用一圆形挡板, 在遮挡中心反相区辐射的同时, 在挡板与辐射板中心区之间构造一个  $\lambda/2$  气隙谐振腔, 达到消除反相相消作用和增强声辐射的目的。这一方法十分显著地改善了气介超声换能器的性能。

**关键词:** 气隙谐振型; 超声波; 换能器

**中图分类号:** T B552 **文献标识码:** A

## An air-gap resonance type of air medium ultrasonic transducer

MA Zhi-min<sup>1</sup>, JIA Hong<sup>2</sup>

(Wuhan university of hydraulic and electric engineering, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** An new air-gap resonance type of air medium ultrasonic transducer is introduced in this paper. The new transducer uses a circular reflecting plate to reflect the radiant wave that comes from the central phase-reversal region and to form a  $\lambda/2$  resonant air gap between the reflecting plate and the central region. The spacious counteraction of the waves is eliminated, the radiant intensity is enhanced and the quality and properties of the transducer are apparently improved with this method.

**Key word:** air-gap resonance type; ultrasonic wave; transducer

### 1 前言

气介式超声物位检测技术由于具有非接触测量、无可动部件、安装方便、使用可靠等特点, 因而得到了广泛的应用, 尤其是对腐蚀性液体液位的检测、各种纸浆和泥浆等液位的检测、固体料位的检测等更具有独特的优点, 因此受到人们的重视。但由于超声波在空气中传播衰减较大, 而且空气的声阻抗很小, 换能器制作难度较大, 以致换能器的辐射效率和接收灵敏度较低, 限制了气介超声测位技术的应用, 所以提高气介超声换能器的灵敏度一直是人们追求的目标。

制约换能器灵敏度的因素主要有两个方面: 一是敏感元件的性能, 如压电陶瓷晶片的压电转换效率; 另一方面就是换能器的结构。正确设计换能器的结构将有助于换能器性能的提高。本文正是从换能器的结构入手, 提出了一种新型高效的气隙谐振型气介超声换能器。

### 2 气介超声换能器的振动模式与存在的问题

因圆盘复合振动型气介超声换能器易于与空气

耦合, 具有较好的灵敏度, 是气介超声换能器最常见的结构, 换能器的结构如图 1。

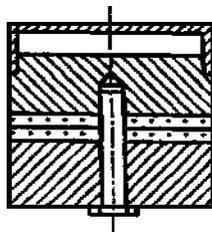


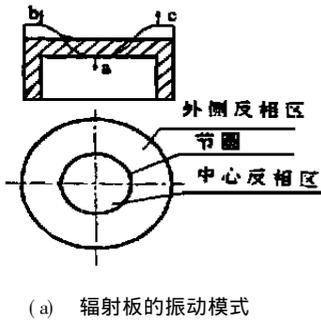
图 1 圆盘复合振动型气介超声换能器

换能器的辐射体为一个弯曲振动的圆盘, 如图 2(a)。分析可知, 当环状振动体边壳较薄时, 圆盘的振动模式近似如图 2(a)。在圆盘的振动辐射面上存在两个互为反相的振动区。如当中心振动区的质点 a 向下运动时, 则外侧振动区的质点 b 和质点 c 向上运动; 反之, 当质点 a 向上运动时, 质点 b 和 c 则向下运动, 所以两区域的振动总是反相的。两区域的交界线构成了一个节圆, 任何时候节圆上的质点都不会发生振动位移。圆盘振动的这种模式很容易通过试验来验证。方法是在圆盘振动板上撒上一层很细的沙粒, 然后加上激励脉冲信号使圆盘振动, 盘面的沙粒产生跳动, 并逐步向节圆上移动, 直至堆积和停止在节圆上。用这种方法可以测出每个换能器节圆

收稿日期: 2000-02-29; 修订日期: 2000-03-13

作者简介: 马志敏(1954-), 男, 副教授。

的大小。



(a) 辐射板的振动模式

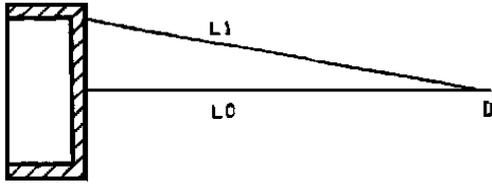


图 2 (b) 两反相区至中轴线上远场点的距离

正因为圆盘的中心振动区(节圆以内的区域)和外侧振动区(节圆以外的区域)的振动总是反向的,所以它们辐射的声波的初相位也总是反相的。考查沿中心轴线远场上的一点 D,如图 2(b),可以认为两振动区域到该点的距离是相等的。如换能器的频率为 40kHz,对应波长  $\lambda = 8.5\text{mm}$ ,圆盘的直径为  $\phi_{6\text{mm}}$ ,对距离换能器轴线上 1m 远处的一点 D,有  $L_0 = 1000\text{mm}$ ,  $L_1 = 1000.08\text{mm}$ ,两区域距该点的距离的最大差值仅为 0.08mm,约为波长的 1%。实际测量的距离往往要远得多,两辐射区域到中轴线反射点的距离差更小,完全可以忽略,即可认为换能器两区域分别到轴线上远场的任一点的距离都是相同的,所以换能器两区域辐射的声波到达该点时也是反相的。设中心辐射区到达该点的声波为  $A_1 \sin \omega t$ ,外辐射区到达该点的声波为  $A_2 \sin(\omega t + \pi)$ ,在该点处叠加后为:

$$A_1 \sin \omega t + A_2 \sin(\omega t + \pi) = (A_1 - A_2) \sin(\omega t) \quad (1)$$

估计的平均频率偏低,在舒张期流速较小,多普勒点接收到的外侧区域辐射波声压幅值。

实际在沿换能器中轴线任一垂直反射面上一定范围的区域内,两振动区域的辐射波总是反相相消的,而超声波的能量主要集中在轴线上一个较窄的区域内,这意味着在有效测量反射面上,两辐射波都是反相相消的,从而使得相当一部分能量被抵消掉,大大降低了换能器的辐射效率。

另一方面,在接收回波信号的状态下,中轴线上

远处任一点返回的声波同时作用在换能器的两个反相振动区上,由于该点到达两反相区的距离相同,换能器两反相区处于回波的同一波阵面上,这就意味着强迫本应是作反向振动的两区域作同相振动,减弱了回波信号的激励效果,从而降低了换能器的接收灵敏度。

综上所述,由于圆盘振动板上存在两个反相振动区,造成了气介式超声换能器发射波之间的相消和接收波之间的相消作用,大大降低了换能器的辐射效率和收灵敏度。

### 3 气隙谐振型气介式超声换能器的结构与原理

显然两反相区能量的相互抵消是制约换能器辐射效率和接收灵敏度的关键性问题,要想最大限度的提高换能器的辐射效率和接收灵敏度就必须有效地利用两反相区的辐射能,使它们能形成同相相加。我们研制的气隙谐振型气介式超声换能器正是按照这一思路进行的。方法是在遮挡中心振动区辐射以消除反相相消作用的同时,在遮挡板与中心振动区之间构造一个  $\lambda/2$  的气隙谐振腔,使得中心区辐射的声波限制在谐振腔内来回反射,并与中心辐射区形成共振,达到加强振动板振动,从而提高外侧振动区辐射强度的目的。

换能器的结构如图 3(a),它是在图 1 结构的基础上,在圆盘振动板的前部增加一个圆形挡板,并与中心振动区保持一定间隙。挡板由金属板制成,挡板的直径等于中心反相区的直径,遮挡板与振动板的间隙  $\delta$  可以通过一旋转调整机构进行调整。

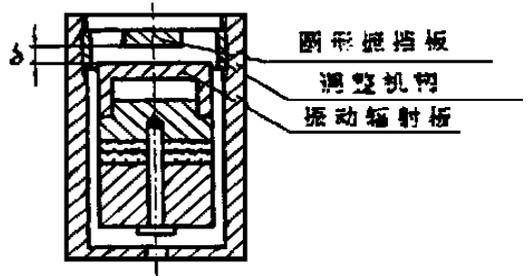


图 3 (a) 气隙谐振型气介超声换能器的结构

当调整气隙间距  $\delta$  使之恰好等于换能器主辐射波的半波长,即  $\delta = \lambda/2$  时,从挡板反射回来的声波到达振动板中心振动区时,正好与中心区的振动相位一致,形成同相叠加,进一步驱动振动板的振动,与此同时声波在气隙中往复振动的频率也与振动板

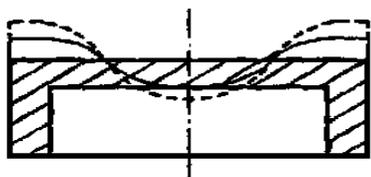


图3 (b) 增加气隙谐振腔前后振幅的变化

的振动频率相一致,两者形成了共振。达到共振后,换能器振动板的振动被显著加强。图3(b)给出了共振前后振幅的变化,图中实线为不加挡板时的振幅曲线,虚线为加掀挡板并调至谐振后的振幅曲线。可以看到外侧振动区的振幅在共振后被显著加强,大大提高了换能器的辐射强度。

这种方法实质上是把中心振动区的辐射能通过谐振的方式转移到了外侧振动区,使两部分能量以同相叠加的方式,通过外侧振动区向外辐射,实现了在消除两辐射区反相相消作用的同时,最为有效地利用了换能器的全部辐射声能,使换能器获得了最佳的辐射效率。

在接收回波信号时,由于中心反相区被遮挡住,从外界反射回来的声波只能作用到外侧振动区上,避免了同一波阵面同时作用在换能器两个反相区而形成的反相相消作用。与此同时,外侧反相区受回波激励产生的振动将传导给中心区域,使之同样产生振动辐射,在气隙谐振腔内再次对回波信号形成共振,进一步提高了换能器的接收灵敏度。

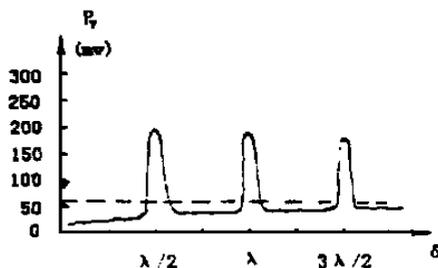
气隙谐振腔的引入,同时还显著改善了换能器的发射波拖尾现象。因为,一般实际的超声换能器不会是完全单一频率的振动,往往是多频率模式的振动,即除主振频率外,还会有多个附频振动,特别是径向的低频振动,更是影响换能器发射波拖尾加长的主要因素。采用气隙谐振腔后,换能器只能对满足  $\lambda = 2\delta/K$  ( $K = 1, 2, \dots, n$ ) 的频率信号产生谐振,而对其它不满足谐振条件的频率分量的振动将是抑制的,所以这种结构有效地抑制其它附频振动,从而减小了发射的拖尾。试验的结果也证明了这一点,即当调整气隙间距使换能器灵敏度达到最高时,发射波的拖尾最窄。

## 4 试验及其结果

### 4.1 $\delta$ 与换能器辐射强度的关系

气隙间距  $\delta$  直接决定了气隙谐振腔的谐振频率,对换能器的辐射性能影响极大,我们对  $\delta$  与换能

器辐射强度的关系进行试验测定。使用另一换能器作为接收换能器,固定在距被测换能器纵轴线上 1m 远处,用以测量发射探头的辐射强度  $P_T$ , 实测结果见图4(a)。从图可见,靠近  $\delta = K\lambda/2$  附近,辐射波迅速增强,在  $\delta = K\lambda/2$  点辐射波幅度达到最大值,偏离  $\delta = K\lambda/2$  稍远处辐射强度快速下降,辐射波幅值的强弱之比达 10 : 1。这一方面说明在满足谐振条件时,换能器辐射板与气隙谐振腔形成共振,换能器辐射波显著加强,有效提高了换能器的辐射效率;另一方面也说明气隙谐振腔结构对不满足谐振条件的其它频率分量有显著抑制作用。图4(a)中虚线绘出了没加圆形挡板时的辐射波声压,约为带谐振腔结构的辐射波声压的 1/3,即采用气隙谐振腔结构后,使得换能器辐射声压增加了 3 倍。



(a)  $\delta$ 与发射波幅度  $P_T$  的关系

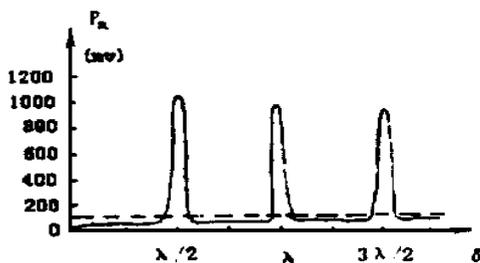


图4 (b)  $\delta$ 与回波幅度  $P_R$  的关系

### 4.2 $\delta$ 与换能器接收灵敏度的关系

试验使用同一换能器兼作收发两用,将换能器垂直对准 3m 远处墙面,调整  $\delta$  值,观察回波幅度  $P_R$ , 结果如图4(b)。它与图4(a)的结果保持了相同趋势。在  $\delta = \lambda/2$  处回波幅度为 1100mV, 图中虚线为不加圆形挡板时的回波幅度,约为 105mV, 可见加气隙谐振腔结构后,回波信号增强了 10 倍。与图4(a)的结果相对比,说明气隙谐振腔结构能使换能器接收灵敏度增加约 3 倍。

### 4.3 挡板直径 $D$ 对换能器灵敏度的影响

圆形挡板的直径  $D$  的大小对换能器灵敏度有

很显著的影响。图5是实测 $D$ 与回波信号幅度比值 $R$ (即不同 $D$ 值的回波幅度与 $D=0$ 时回波幅度之比)的关系曲线,其中 $d_0$ 为弯曲振动圆盘的节圆直径。由图可知当 $D=d_0$ 时, $R$ 的值最大,即此时换能器灵敏度最高。

此外,对圆形挡板的厚度的影响也进行了试验,结果表明,采用厚度为0.2mm和0.5mm的不锈钢片做成的圆形挡板,与采用厚度为1.0mm-1.5mm的铝合金片做成圆形挡板对换能器灵敏度无明显影响,实际采用1.0mm厚的铝合金片做成圆形挡板。

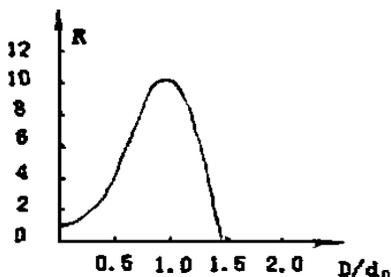


图5 挡板直径 $D$ 与回波幅值比 $R$ 的关系

#### 4.4 发射波拖尾试验

同一换能器不加圆形挡板时,实测换能器的发射波拖尾宽度约为6ms,采用气隙谐振结构并调整 $\delta=K\lambda/2$ 时信号幅度最强,同时发射波拖尾也最窄,约为3.5ms-4ms。可见气隙谐振结构有效减少了换能器的测量盲区。

(上接第132页)

提高到14.5dB,多次独立试验的结果也是一致的。

需要指出的是,这里的正交小波选用Daubechies 4小波,它具有4阶消失矩,根据(4)式的结论,这样可以保证对分形噪声具有较好的白化作用。另外,多分辨分析的最大尺度 $L$ 取为7,因为在大尺度上分形噪声的移不变小波系数相关性较强,所以 $L$ 不能太大。

#### 4 结 语

本文针对分形噪声中谐波信号的提取问题,提出将移不变小波变换与自适应自调谐滤波器组结合起来的滤波算法。从原理上阐明了其可行性,并通过仿真验证了它的有效性。结果表明,通过本算法,能够消除分形噪声的长程相关性,可以在未知谐波信号知识的情况下,得到信号的较好估计。舰船辐射噪

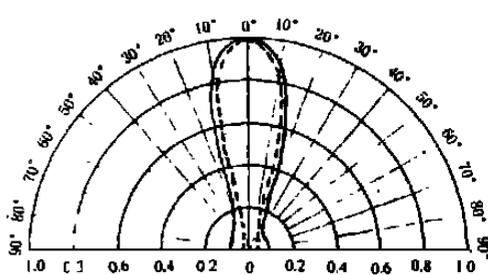


图6 换能器指向性

#### 4.5 换能器的指向性

图6中虚线为不加圆形挡板时换能器的指向性,实线为加圆形挡板并调至谐振后换能器的指向性,比较可看出,采用气隙谐振结构后换能器辐射指向性却略微变差。由于实际应用中通常采用喇叭进行聚焦,以提高指向性,所以指向性完全可以通过加喇叭来补偿。

#### 5 结束语

综上所述,气隙谐振型气介式超声换能器的辐射效率、接收灵敏度以及发射波的拖尾都比圆盘复合振动型气介超声换能器得到了十分显著的改善。

参考文献:

[1] 金长善.超声工程[M].哈尔滨工业大学出版社.  
[2] 同济大学声学研究室.超声工业测量技术[M].上海人民出版社.

声是一类非平稳随机信号,研究表明<sup>[6]</sup>:它们在一定尺度范围内符合分形布朗运动模型,因此,预计本文提出的方法将有助于从舰船辐射噪声中提取出有用的谐波信息,相关的研究工作正在进一步开展。

参考文献:

[1] Chen B S, Lin C W. Multiscale wiener filter for the restoration of fractals: Wavelet filter bank approach[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(11): 2972-2982.  
[2] Hirchoren G A, D' Attellis C E. Estimation of fractal signals using wavelets and filter banks[J]. IEEE Trans on SP, 1998, 46(6): 1624-1630.  
[3] 肖创柏,李衍达.分形差分高斯噪声中正弦波频率估计[J].通信学报,1996,17(3): 21-26.  
[4] Wornell G W, Oppenheim A V. Estimation of fractal signal from noisy measurements using wavelets[J]. IEEE Trans on SP, 1992, 40(3): 611-623.  
[5] Widrow B et al. Adaptive noise cancelling: Principle and applications[J]. Proc IEEE., 1975, 63(12): 1692-1716.  
[6] 高翔,陆信人.舰船辐射噪声的分形布朗运动模型[J].声学学报,1999,24(1): 19-28.