

# 超声地形障碍检出系统换能器的研制<sup>①</sup>

王清池

吴在勋

(厦门大学海洋学系 厦门 361005)

(中国船舶总公司 721厂 无锡 214061)

**摘要** 介绍适用于超声地形障碍检出传感系统,向空气辐射的弯曲振动型超声换能器的研制.该换能器结构简单,制作方便,可在空气介质中产生高强度的超声波和良好的方向性.

**关键词** 超声换能器,变幅杆,弯曲振动

中国图书分类号 O 426 1

用于地形勘测机器人的超声地形障碍检出传感系统,它除了要测量 15 m 内,大于 0.25 m<sup>2</sup> 的突出障碍的距离和方向外,尚需判断突出障碍物的高度,凹坑的宽度和深度等主要参数,才能有效地引导机器人的行动.根据系统的要求,需要研制一种适宜于野外现场条件下,承受较大功率、高指向性(波束宽度 4°左右),频率为 40 kHz 左右,在空气介质中具有高效率的超声换能器.

超声地形障碍检出传感系统的换能器是由纵向换能器前表面接上一级半波长的圆锥形变幅杆激发圆板振动,通过振动圆板向空气介质辐射超声波.它由三部分组成:1)纵向振动换能器;2)半波长圆锥形变幅杆;3)弯曲振动阶梯圆盘.其结构如图 1.

## 1 纵向复合式振子的设计

纵向复合振子由前盖板、晶堆、后盖板和预应力螺杆等部分组成(结构如图 2).

### 1.1 压电晶堆的选择

选用 PZT-8,  $\varnothing_{\text{外径}} 25 < \varnothing_{\text{内径}} 8.5 < 5$ , 二片并联组成.

晶片选择的原则:

1) PZT-8 是铁酸钙改性的锆钛酸铅二元系压电材料,其特点是强场介电损耗低,介电损耗和机械损耗在高电压、高静压和较高的温度下变化很小,并且机械强度高,矫顽场高.在大功率驱动,使用条件较苛刻的情况下选用 PZT-8 压电材料.

2) 直径比厚度大得多的陶瓷片,它的低频振动模式就是径向振动模式.除径向谐振基频外,还有很多不成简单比例关系的谐振频率.为了避免振子的工作频率与晶片径向谐振频率或

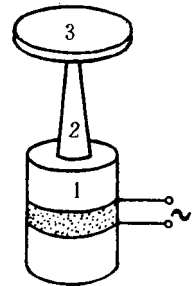


图 1 超声换能器

Fig. 1 Ultrasonic transducer

<sup>①</sup> 本文 1996-08-09 收; 国家自然科学基金资助项目.

其谐振频率之间互相耦合,要求陶瓷片直径小于对应谐振频率在介质材料中的声波波长的四分之一。

前盖板为轻金属合金铝,其声速  $C=5200\text{ m/s}$ 。当  $f=48\text{ kHz}$ 时,则  $\lambda=10.8\text{ cm}$ ,所以  $\lambda/4=27\text{ mm}>$  晶片  $\varnothing 25$ 。

3)功率容量的考虑:根据资料报道<sup>[1]</sup>铌钛酸铅发射材料的功率容量为  $6\text{ W/cm}^3 \cdot \text{kHz}$ 。设计时,留有余地,采用  $3\text{ W/cm}^3 \cdot \text{kHz}$ 。

选用  $\varnothing_{\text{外径}} 25 \times \varnothing_{\text{内径}} 8.5 \times 5$  的 PZT 压电晶片两片并联,晶堆的体积  $V=4.34\text{ cm}^3$ ,其功率容量  $W=625\text{ W}$ 。

4)压电振子的有效机电耦合系数与纵向振子前后盖板振速比都要求高是有矛盾,由这两个因素权衡,取  $K_1(L_1+L_3)=0.9, K_1=(2cf)/C_1, C_1$  为晶片纵向声速:  $2900\text{ m/s}$ ,所以晶堆的总长度  $(L_1+L_3)=0.87\text{ cm}$ ,选用  $L_1=L_3=5\text{ mm}$ 。

根据上述原则,压电陶瓷片选用 PZT-8,规格为  $\varnothing_{\text{外径}} 25 \times \varnothing_{\text{内径}} 8.5 \times 5$ ,两片并联。

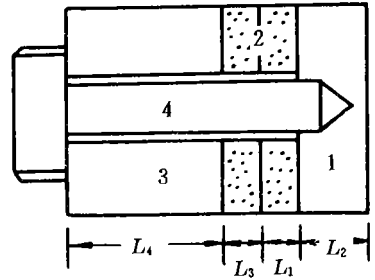


图 2 纵向复合式振子  
Fig. 2 Longitudinal composite piezoelectric vibrator  
1. Front panel  
2. PZT crystal  
3. Rear panel  
4. Pre-stress bolt

### 1.2 后盖板的计算

据动量守恒定律,节面两边的动量大小相等.为提高前后盖板的振速比以增大前盖板的声辐射,后盖板为重金属 35# 钢,其声速  $C_b=5.17 \times 10^5\text{ cm/s}$ ,密度  $d_b=7.89\text{ g/cm}^3$ .前盖板采用轻金属 铝合金,其声速  $C_2=5.2 \times 10^5\text{ cm/s}$ ,密度  $d_2=2.66\text{ g/cm}^3$ .前后盖板的振速比为 3:1.

后盖板的长度  $L_4=\lambda/4=27\text{ mm}$ 。

### 1.3 前盖板的计算

由半波长纵向复合式振子的频率方程<sup>[2]</sup>:  $\text{tg}K_1(L_1+L_3)\text{tg}K_2L_2=Z_1/Z_2$ ,式中  $Z_1=d_1C_1$  晶片的特性阻抗,  $(L_1+L_3)$  晶堆总长,  $L_2$  前盖板长度。

$Z_2=d_2C_2$  前盖板的特性阻抗,  $C_1=2900\text{ m/s}$  为晶片材料的纵向声速。

$K_1=2cf/C_1, d_1=7.6\text{ g/cm}^3$ , 为 PZT-8 材料的密度。

$K_2=2cf/C_2, C_2=5200\text{ m/s}$ , 为前盖板材料的声速。

$d_2=2.66\text{ g/cm}^3$ , 为前盖板的密度。

将以上参数代入频率方程中,可得  $L_2=13\text{ mm}$ 。

### 1.4 予应力螺杆

换能器的机械功率极限为<sup>[3]</sup>

$$(P_m)_{\text{max}} = \frac{2cf_r}{Q_m} \left( \frac{T_{\text{max}}^2}{2dC^2} \right) V$$

式中  $T_{\text{max}}$  为压电陶瓷的动态允许张应力,  $\rho$  为陶瓷的密度,  $C$  为陶瓷的声速,  $Q_m$  为换能器的机械品质因数,  $f_r$  为换能器的谐振频率,  $V$  为晶片体积。

从式中可以看出:换能器的机械功率与压电陶瓷动态允许张应力  $T_{\text{max}}$  成正比. PZT 的动态张应力约为  $2.4 \times 10^7\text{ N/m}^2$ ,施加予应力螺杆使其允许动态张应力提高一倍,达  $4.8 \times 10^7\text{ N/m}^2$  由此可见,纵向复合压电振子施加予应力螺杆,可提高压电陶瓷的抗张强度,从而提高

换能器的机械功率极限,防止换能器在大功率驱动下压电陶瓷破裂.在工艺上,对压电陶瓷按  $250 \text{ kg/cm}^2$  施加予应力<sup>[4]</sup>.予应力螺杆选用具有良好弹性性能的 40# 钢制成.

## 2 半波长圆锥形变幅杆的设计

如果把纵向复合式振子看成是振动的推动级,则半波变幅杆(或称半波增幅杆)就是振幅的放大级.常见的变幅杆的形状有:悬链形、指数形、圆锥形、阶梯形等.我们采用便于加工的圆锥形变幅杆,使用内部损耗小,机械强度大的铝镁合金材料制成.

假定圆锥形变幅杆的横截面积尺寸小于谐振频率所对应波长的四分之一,因此,可以认为波在变幅杆中传输时,其波阵面近似为一平面波,并且认为应力在横截面上是均匀分布的,即变幅杆的纵向形变所引起横向形变很小,不致引起应力波的波阵面产生畸变.

圆锥形变幅杆大端直径  $D_1 = 25 \text{ mm}$ .取小端直径  $D_2 = 8 \text{ mm}$ ,则两端的直径比  $N = D_1/D_2 = 3.1$ .工作频率  $f = 48 \text{ kHz}$ ,根据文献[5]中图 2.5,由  $N$  求得谐振条件下变幅杆的长度  $L_p = \frac{\lambda}{2} \frac{(kL)}{c} = 60 \text{ mm}$ .

变幅杆的放大系数  $M_p = |N(\cos kL - \frac{N-1}{NkL} \sin kL)| = 2.7$ .

## 3 弯曲振动阶梯形式辐射圆盘

### 1) 圆盘尺寸的确定

为了获得有效的声波辐射,采用换能器激励薄金属圆盘作弯曲振动(弯曲谐振器).将辐射盘表面组成阶梯形式,其阶梯高度等于辐射介质中的二分之一波长,经过这样修正后的这种弯曲振动阶梯盘作辐射面产生的声场与理想的活塞式振动的声场十分类似.

对于圆形活塞换能器,波束宽度为

$$\theta_{-3\text{dB}} = 2 \sin^{-1}(0.5 \lambda D^{-1})$$

当  $\theta_{-3\text{dB}} = 3.5^\circ$ ,圆盘的直径  $D = 117 \text{ mm}$ ,采用  $\varnothing 120$  铝合金材料,圆盘直径取  $118 \text{ mm}$ .

### 2) 相位补偿原理

连接在换能器上被激励的薄金属圆盘作弯曲振动模式.当圆盘作一个或若干个节圆振动时,在节圆两边的振动相位相反,因此,在它的声场中发生相位相反的相消干涉,将部分的辐射超声被抵消,而使其辐射效率降低.为了提高辐射效率,GALLEGO<sup>[6]</sup>将辐射盘表面组成阶梯形式,使波节的某一侧面沿声轴方向移动一个  $L$  值,当  $L$  值等于这振动在传播介质中辐射声波的半波长的整数倍,即  $L = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 时,则可以得到一个辐射声场,在这声场中将发生相位相同的相干辐射场.显然,为了使问题简化,只须把波节某一侧的平板厚度改变  $\lambda/2$  即可,即  $n = 0, L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f}$ ,  $C$  为声波在辐射介质中的声速,  $f$  为圆盘作轴向振动的频率.

圆盘轴对称弯曲振动模式的振动节圆采用浮悬法,用金钢砂粉末显示.

阶梯圆盘的辐射机理如图案 3.盘的横截面用直线  $P$  表示,线  $W$  代表动态变形曲线,曲线  $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  表示了在空中质点运动的垂直分量.从图中可以看到,曲线  $A_{2n}$  和曲线  $A_{2n}$  是反相的.如果圆盘组成阶梯形,在每一个波节的一侧向前移动  $\lambda/2$ ,在图 3a 中平板表面移到  $X_0X_1, X_2X_3 \dots$  的位置,在图 3b 中平板表面移到  $X_0X_1, X_2X_3 \dots$ .修正后在空中质点运

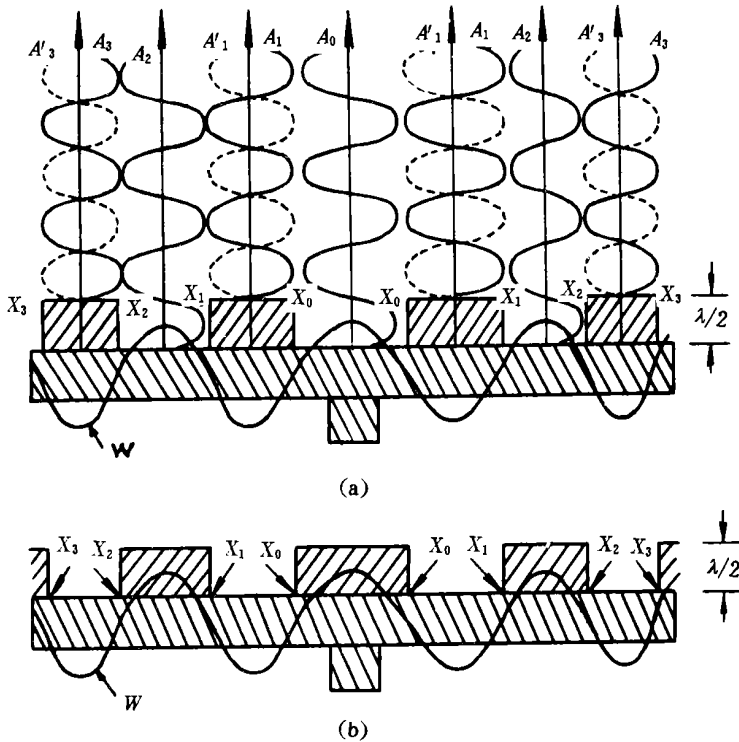


图 3 阶梯盘辐射机理

a. 中心区凹下    b. 中心区凸出

Fig. 3 Radiative principle of the stepping plate

动的垂直分量由新的曲线  $A'_1, A'_3 \dots$  表示,  $A'_1, A'_3 \dots$  与  $A_0, A_2 \dots$  等曲线出现同相相干辐射. 这样修正后的辐射圆盘避免了在节圆两边振动相位相反, 导致一部分辐射超声相位相反的相消干涉, 从而使介质中的振动幅度增大, 介质获得的能量亦增大, 提高了辐射效率.

### 4 测试结果

研制出的超声地形障碍检出传感系统超声换能器经测试, 换能器的有关电声性能参数列于表 1.

表 1 1号、2号换能器的电声参数

Tab. 1 Electroacoustic parameters of 1、2 transducer

谐振频率 $f_r$ (kHz)	等效电阻 $R_d$ ( $\Omega$ )	静态电容 $C_0$ (pF)	波束角 $\theta_{-3dB}^{(a)}$	带宽 $\Delta f$ (kHz)	旁瓣级 (dB)
48.13	836	1 756	3.6	2.07	-16
47.50	840	1 787	3.7	2.15	-16

换能器的电声参数测试表明,研制的换能器的谐振频率、波束角,特别是其旁极大有 16 dB 的衰减,符合超声地形障碍检出传感系统的要求.

1号、2号气介超声换能器已用于有关的课题.

## 参 考 文 献

- 1 陈桂生. 超声换能器设计. 北京: 海洋出版社, 1984: 117
- 2 袁易全. 超声换能器. 南京: 南京大学出版社, 1992: 268
- 3 王清池. 垂直探鱼仪换能器的稳定性. 海洋技术, 1987, 6(1): 41
- 4 荣德新. 纵向压电换能器的予应力控制. 应用声学, 1983, 2(1): 28
- 5 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计. 北京: 科学出版社, 1987: 84-95
- 6 Barone A, Gallego J A. Flexural vibrating free-edge plates with stepped thicknesses for generating high directional ultrasonic radiation. *J. A. S. A.*, 1972, 51(3): 953-957

## Study on the Ultrasonic Transducer Used in the System for Detecting and Sending the Obstacles

Wang Qingchi

(Dept. of Oceanog. and Inst. of Subtropical Oceanog., Xiamen Univ., Xiamen 361005)

Wu Zaixun

(721 Factory, China State Ship Building Co., Wuxi 214061)

**Abstract** This paper introduces a kind of ultrasonic transducer which emits the sound wave to the air in the style of flexuous vibration and is fit to be used in the system for detecting and sensing the obstacles. The transducer with a simple structure is easy to be made and can produce strong ultrasonic waves in the air with a good directional character.

**Key words** Ultrasonic transducer, Amplitude-variable rod, Flexuous vibration