



浅海四分量勘探之第四分量检波器的研究

李建良, 赵 耀

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 针对用于浅海滩涂地带的浅海四分量石油勘探之第四分量检波器——水听器进行了研究, 从传感器网络模型出发, 推导了水听器的传递函数, 得出了外力与水听器敏感元件应力应变之间的关系, 并对水听器建立了振动模型、进行了动态特性分析. 设计了水听器的结构, 并计算了灵敏度、确定了水听器的参数. 对浅海石油水听器进行了性能和灵敏度测试. 结果表明, 水听器满足浅海勘探的要求.

关键词: 压电陶瓷; 四分量; 水听器; 石油勘探

中图分类号: TB565⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-6510 (2008) 02-0065-04

Research on the Fourth Heft Geophone of Shallow Sea 4C Oil Exploration

LI Jian-liang, ZHAO Yao

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: The fourth heft geophone of shallow sea 4C oil exploration-hydrophone used in the shallow sea and beach was analyzed. The transfer function of the piezoelectric sensor was ascertained with the network model. The relation between stress-strain of the hydrophone sensing element and external force was derived. Both dynamic characteristics analysis and vibration model of the hydrophone were done. The hydrophone structure was designed. The sensitivity of the hydrophone was analyzed and the parameters of the hydrophone were disserted. Performance and sensitivity test of the hydrophone show that the hydrophone meets the shallow sea exploration demand.

Keywords: piezoelectric ceramics; 4C; hydrophone; oil exploration

随着海洋石油勘探工作的深入, 对地形水情复杂的地质普查日益引起重视. 海上四分量地震勘探 (M4C) 又称为多波地震、多波多分量地震勘探或矢量地震勘探. 海上四分量地震检波器是由 1 个水听器及相互正交的 3 个地震检波器组成的四分量检波器单元放在海底^[1], 用来记录应力的压力波和切变波. 对 M4C 数据可进行充分的数据处理, 使许多地质解释成为可能^[2], 解决了检测过程中的海水交互混响问题, 能够提供对包括储层边界在内的更完全的储层性质的解释. 近些年来, 许多国家都投入大量人力、物力来研究高灵敏度, 噪声小, 分辨率高的检波器. 但是, 目前市场上的检波器在灵敏度方面还没有满足现代海洋石油勘探的数据采集要求. 因此, 对四

分量检波器的研究具有一定的实用价值. 作为第四分量的水听器, 用来接收海水中传播的纵波, 是一种具有高内阻而输出信号又很弱的双向有源传感器^[3], 是应用于海洋地质勘探以及工程测量领域的专用传感器. 本文对水听器理论进行了研究, 设计了水听器结构, 并进行了实验研究.

1 水听器数学模型

根据能量守恒, 对利用压电原理的水听器建立功率平衡方程. 根据网络概念, 能量可逆的理想传感器可视为一个双向网络, 如图 1 所示^[4]. 其输入端 (机械端) 的输入量为力 F_t 和速度 v_t , 输出端 (电气端)

收稿日期: 2008-02-27; 修回日期: 2008-03-20

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目 (20060622)

作者简介: 李建良 (1973—), 男, 天津人, 讲师.

的输出量为电压 e_t 和电流 i_t , 图 1 中各量的流向使机械功率 P_M 和电功率 P_E 均为正, 分别为

$$P_M = \frac{1}{2} \text{Re}(F_t, v_t^*) = \frac{1}{2} \text{Re}(v_t, F_t^*)$$

$$P_E = \frac{1}{2} \text{Re}(e_t, i_t^*) = \frac{1}{2} \text{Re}(i_t, e_t^*)$$

式中: F_t^* 、 v_t^* 、 i_t^* 、 e_t^* 分别为 F_t 、 v_t 、 i_t 、 e_t 所对应的共轭量. 水听器电气端是基于电流源工作模式, 则 e_t 为自变量, 于是有

$$F_t = Ne_t \tag{1}$$

$$v_t = -\frac{1}{N^*} i_t \tag{2}$$

式中: N 为理想传感器作为电流源时的传感常数; N^* 为 N 的共轭量. 将式 (1)、式 (2) 用矩阵表示, 有

$$\begin{bmatrix} F_t \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & -1/N^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_t \\ i_t \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: $\begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & -1/N^* \end{bmatrix}$ 为理想传感器作为电流源时的连接矩阵.

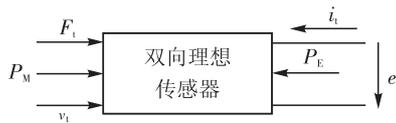


图 1 理想传感器网络

Fig. 1 Ideal sensor networks

实际传感器的两端分别存在机械阻抗和电阻抗, 如图 2 所示.

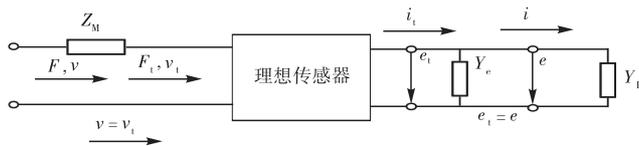


图 2 电流源型实际传感器框图

Fig. 2 Current Source model of the actual sensor

机械端:

$$F = F_t + Z_M v_t; v = v_t$$

电气端:

$$e_t = e; i_t = -Y_e e + i$$

式中: Z_M 为传感器机械系统的机械阻抗; Y_e 为传感器电气部分的电导纳.

将机械端和电气端关系式分别写成矩阵形式, 有式 (4) 和式 (5).

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_t \\ v_t \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} e_t \\ i_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -Y_e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ i \end{bmatrix} \tag{5}$$

将式 (3)、(4)、(5) 三个矩阵联级, 即传感器作为电流源时的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & -1/N^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -Y_e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ i \end{bmatrix}$$

也可写成

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N + Z_M Y_e / N & -Z_M / N^* \\ Y_e / N & -1 / N^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ i \end{bmatrix} \tag{6}$$

对于水听器, 传感器常数 $N = C/d$, $N^* = -C/d$, 代入式 (6) 有

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C/d + Z_M Y_e d / C & Z_M d / C \\ Y_e d / C & d / C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ i \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: d 为压电常数; C 为传感器固有电容. 因为 $i = +Y_L e$, 其中 Y_L 为水听器负载导纳, 式 (7) 可写成

$$\frac{e}{F} = \frac{C/d}{(C/d)^2 + Z_M(Y_c + Y_L)} \tag{8}$$

将 $Z_M = c + j\omega m - j\frac{K}{\omega}$ 和 $Y_c = j\omega C$ 代入式 (8), 得到压电传感器的传递函数为

$$\frac{e}{F} = \frac{C/d}{(C/d)^2 + [c + j\omega m - K/\omega][Y_L + j\omega C]} \tag{9}$$

式中: c 为传感器阻尼系数; m 为质量体质量.

从式 (9) 可以看出, 传感器的输出电压 e 与压电系数 d 成正比, 而与它的固有电容 C 成反比. 而且负载电阻 $R_L = \frac{1}{Y_L}$ 具有很大数值才能保证其有高的电压输出和有用的频率范围.

2 水听器结构设计

2.1 工作原理

在浅海四分量地震勘探过程中, 使用四分量地震检波器. 工作时由勘探船激发震动信号, 其中三个正交的检波器接收来自于海床以下的地震波, 水听器接收海水中的压力波. 水听器中的压电陶瓷由于受压力作用而产生电荷输出. 这种电荷输出就是水听器附近介质受地震信号传输中引起的水压变化而形成的电信号^[5]. 检波器将记录的震动信号传回勘探船中的接收仪器, 并进行数据处理、分析和解释工作, 从而达到地震勘探目的.

由于水听器的特殊工作环境, 设计中要考虑几个

方面:(1)海水具有腐蚀性和导电性,对外壳材料的选择要考虑到防腐性和绝缘性;(2)由于在水下工作,要保证水听器在相应的温度下能够正常工作;(3)除了震源给水听器带来的振动外,海流运动形成的潮汐、海啸等自然状况都会对水听器造成一定的冲击,设计中要考虑材料的耐振动和冲击性能;(4)保证所受的外界力能被压电元件更好地接收,要考虑材料的弹性性能。

2.2 敏感元件的结构设计

水听器的敏感元件采用薄片状压电陶瓷片,其结构如图3所示。

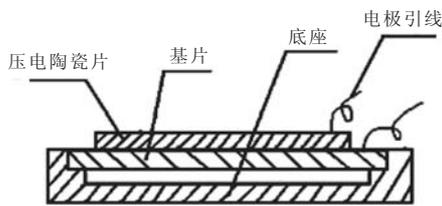


图3 圆片状压电陶瓷片结构图

Fig. 3 Structure map of circular piezoceramics

圆片状压电陶瓷片的两面采用镀银工艺,基片镀铜,电极引线正极焊在压电陶瓷的一面,负极焊在镀铜上,底座采用铜合金,基片与底座之间留有保护间隙,当外界静压力超过允许的范围时,基片弯到底部达到自动保护。

2.3 结构设计

水听器的结构如图4所示。水听器的设计采用应力放大机构,即通过四个支点将应力传递给敏感元件上的压电陶瓷,保证敏感元件对力的接收。此外,从可靠性角度出发,对所有部件用聚胺脂弹性体注塑,保证水听器的绝缘电阻达到设计要求。水听器实物如图5所示。

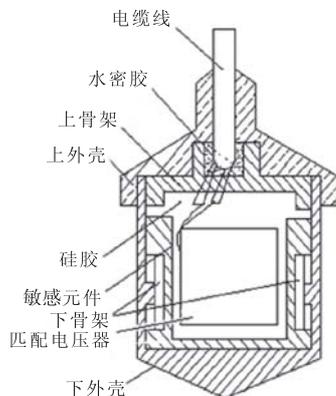


图4 水听器结构简图

Fig. 4 Sketch map of hydrophone structure



图5 水听器实物照片

Fig. 5 Hydrophone photo

3 参数设计

3.1 水听器谐振频率计算^[6]

四个敏感元件,分别对称地安装于骨架的外壁上,与变压器的初级相连接,输出的电信号经变压器降压后,由次级线圈通过电缆输出,其等效电路如图6所示。

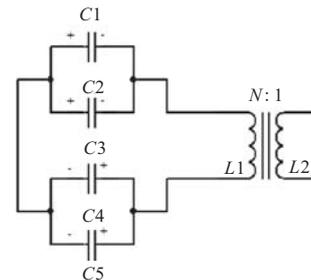


图6 水听器的等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit of hydrophone

图6中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为四个敏感元件的容量; $N:1$ 为变压器的初、次级之比; L_1 、 L_2 分别为初、次级的电感量。在匹配变压器输入端的总电容为

$$C_0 = \frac{(C_1 + C_2) \cdot (C_3 + C_4)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \quad (17)$$

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_0}} \quad (18)$$

水听器变压器的初级电感量为8000H,敏感元件的电容为28000pF,则水听器的谐振频率为10.63Hz。水听器的谐振频率是一个重要参数,越低越好,但是谐振频率太低会降低检波器的接收电压灵敏度。

3.2 水听器灵敏度计算

根据设计的水听器的结构和水听器灵敏度定义

可得, 压电灵敏度为

$$M = \epsilon_r \epsilon_0 S / t \cdot d \tag{19}$$

式中: S 为压电陶瓷的有效面积; t 为厚度. 则敏感元件的灵敏度为

$$M = \frac{3}{8} g_{31} \frac{r^2}{t} \tag{20}$$

式中: g_{31} 为压电陶瓷的压电常数; r 为压电陶瓷的半径.

当采用两串两并结构时, 经变压器 N 倍降压后水听器的压电灵敏度为

$$M_0 = \frac{2}{N} M = \frac{3}{4} g_{31} \frac{r^2}{N \cdot t} \tag{21}$$

取 $N=6$, 压电陶瓷 PZT-5 的 $g_{31}=11.4 \times 10^{-3} \text{V} \cdot \text{m/N}$, $r=8.75 \text{mm}$, $t=0.5 \text{mm}$, 则 $M_0=22 \mu\text{V}/\mu\text{bar}$, 相应的灵敏度级为 -193dB (基准值为 $1\text{V}/\mu\text{Pa}$).

要提高水听器的压电灵敏度和降低谐振频率, 加大陶瓷片的半径和降低陶瓷片的厚度是有效的, 但当陶瓷片的厚度过薄时将给生产和使用带来困难.

4 实验

使用海洋检波器测试仪^[7]测得本课题制作的水听器谐振频率 14Hz 、灵敏度 -194dB . 其频率响应曲线如图 7 所示.

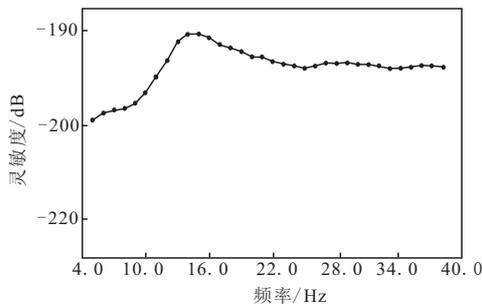


图 7 水听器频率响应曲线图

Fig. 7 Frequency response curve map of the hydrophone

从图 7 可看出, 水听器的灵敏度在谐振频率以后变化很小. 谐振频率与理论值之间的相对误差为

2.7%, 灵敏度与理论值之间的相对误差为 0.5%. 谐振频率误差较大主要是因为筛选的压电陶瓷电容大小匹配不能达到理论值, 并且变压器绕制时的初级线圈电感量不为 8000H . 解决办法是进一步筛选压电陶瓷, 使四个压电陶瓷片电容一致.

5 结 语

从传感器网络模型出发, 推导了压电传感器的传递函数、压电灵敏度、谐振频率与器件材料参数、几何尺寸及负载之间的关系; 对四块压电陶瓷片筛选配对, 四块圆片状压电陶瓷串并联后再配接匹配变压器, 使水听器参数得到了保证. 理论分析计算表明, 水听器的输出电压与压电系数成正比, 而与它的固有电容成反比. 提高水听器的压电灵敏度和降低谐振频率, 加大陶瓷片的半径和降低陶瓷片的厚度是有效的, 但当陶瓷片的厚度过薄时将给生产和使用带来困难. 对设计的水听器进行了测试, 与标准数据进行比较, 进行了误差分析. 结果表明, 设计的水听器符合使用要求, 能满足浅海石油勘探的精度要求, 有一定的应用前景.

参 考 文 献:

- [1] 何仁汉. 三分量地震检波器综述 [J]. 地学仪器, 1995, 2: 1—5.
- [2] 熊金良, 王长春. 海上四分量地震勘探综述 [J]. 中国煤田地质, 2000, 12 (3): 39—44.
- [3] 何道清. 传感器与传感器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 133—154.
- [4] 单成祥. 传感器的理论与设计基础及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 260—265.
- [5] 李金田. 压电传感器与前置放大器的配接 [J]. 传感器技术, 2004, 1: 54—56, 59.
- [6] 路建东. 浅海石油水听器及连接器系统的研制 [D]. 天津: 天津大学, 2001.
- [7] 易碧金. 地震仪器中地震道检波器的测试原理和方法 [J]. 物探装备, 1998, 8 (2): 6—9.