

纵振型低频压电水听器的等效电路及有限元分析对比研究

徐言哲, 范桂芬, 田 丰, 邓皓元, 胡洪平, 吕文中

(华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 分别利用等效电路理论与 ANSYS 有限元仿真对纵振型复合棒式压电水听器的性能参数进行了计算, 并将两种结果进行对比分析。对比发现两种分析方法得出的接收灵敏度最大值对应的频率不在同一处并且在数值上存在一定差异, 在远离谐振点的较低频段, 水听器的接收灵敏度都具有较为平坦的响应。等效电路理论只考虑了一维纵向振动并且将模型完全理想化, 而 ANSYS 有限元分析则考虑了整个结构的纵向横向模态耦合, 其建模更接近实际模型, 因此 ANSYS 有限元分析在水听器的仿真优化设计中更符合实际情况, 但还需制作实物, 用实测结果进行比对。等效电路理论由于物理意义明显, 可以为水听器设计和有限元仿真提供理论指导。

关键词: 等效电路理论; ANSYS 有限元仿真; 接收灵敏度

中图分类号: TB565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-06-0710-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.06.019

Comparative research on equivalent circuit and finite element analysis of longitudinal vibration type low-frequency piezoelectric hydrophones

XU Yan-zhe, FAN Gui-fen, TIAN Feng, DENG Hao-yuan, HU Hong-ping, LYU Wen-zhong

(The School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The equivalent circuit theory and ANSYS Finite Element Simulation are used to calculate the performance parameters of longitudinal vibration type composite rod piezoelectric hydrophone, and the two calculation results are compared. It is shown that the resonant frequencies of the receiving sensitivity obtained by the two methods are not in the same place, and there are some differences in the value of receiving sensitivity, and that the bandwidths of receiving sensitivity are all rather wide in the lower frequency band far from the resonance point. It is known that the equivalent circuit theory only considers the one-dimensional longitudinal vibration and idealizes the model. However, the ANSYS finite element analysis considers the longitudinal and transverse modal coupling of the whole model structure, which is closer to the actual model. Therefore, ANSYS has more advantages in the simulated optimization design of hydrophone. The equivalent circuit theory can provide theoretical guidance for finite element simulation because of its obvious physical significance.

Key words: equivalent circuit theory; ANSYS finite element simulation; reception sensitivity

0 引 言

水声换能器是发射和接收水中声信号的装置, 是进行水声学研究的核⼼设备, 其性能好坏直接影响水声设备的性能^[1]。水声换能器按其工作状态的不同, 可以分为两类: 把电磁能转化成声能的一类

称为发射器, 把声能转化为电磁能的一类称为接收器, 也称为水听器^[2]。PZT(锆钛酸铅)作为压电陶瓷的一种, 其机电耦合系数高、压电常数大、稳定性好, 常被用来作为制备压电水听器的换能元件。目前高低频压电水听器的应用都较为广泛, 但关于低频纵振型压电水听器, 尤其是其在次声波范围的研究和应用较少。

地震、海啸、核爆及火山喷发都会产生次声波, 次声波传播时衰减⼩, 传播距离远。水下地震监测, 海啸预报、核爆检测及火山喷发等领域都急需低频、宽带、高灵敏度的水听器^[3-6]。因此, 低频水听器具有极其重要的研究意义。常用的压电水听器结

收稿日期: 2018-05-31; 修回日期: 2018-06-28

基金项目: 中央高校基本科研专项资金, 华中科技大学(2016JCTD114)

作者简介: 徐言哲(1995-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为水声换能器与有限元仿真。

通讯作者: 吕文中, E-mail: lwz@hust.edu.cn

构为纵振复合棒式结构，人们在分析该换能器的工作模式及器件性能时常采用两种方法：一为等效电路法，即将器件等效为理想的阻容元件^[7]，二为采用有限元建模分析法，国内多位学者进行了研究^[8]。但这两种方法由于计算方法和建模的不同，分析结果会有一定的差别。因此本文分别利用等效电路理论和 ANSYS 有限元仿真，对纵振型复合棒式水听器的性能参数进行理论计算并且进行对比，希望得到一些今后能指导水听器设计计算的有益结论。

1 利用等效电路理论分析纵振复合棒式水听器的性能参数

纵振复合棒式水听器的结构图如图 1 所示，将纵振复合棒式水听器看作由前盖板、压电晶堆、后盖板 3 部分组成的机械振动体，忽略了预应力螺栓，由波动理论得出机械振动方程，根据边界条件求解，再由压电方程和机电类比的方法，建立等效电路。

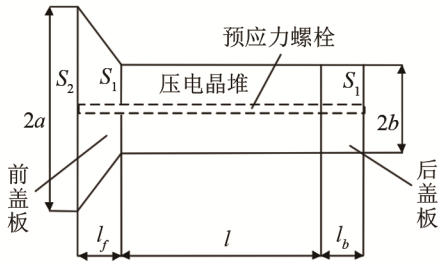


图 1 纵振复合棒式水听器结构示意图

Fig.1 The structure diagram of longitudinal vibration piezoelectric hydrophone

等效电路理论的优点是能够直观表达物理意义，结构参数及材料参数能直观体现在数学表达式中^[7]。由上述方法，分别得到纵振复合棒式水听器前盖板、压电晶堆、后盖板 3 部分的等效电路图，再将三者串联，得到最终的等效电路图^[2]，如图 2 所示，图中 A、B、C 三个虚线框中分别为后盖板、压电晶堆、前盖板的分块等效电路。

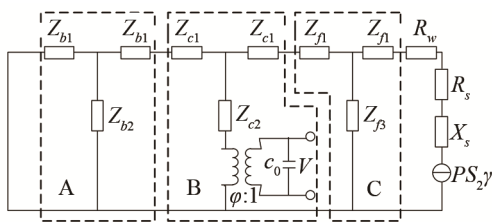


图 2 纵振复合棒式水听器的等效电路图

Fig.2 The equivalent circuit diagram of longitudinal vibration low-frequency piezoelectric hydrophone

图 2 中各阻抗表达式如下^[2]：

$$Z_{b1} = j\rho_1 c_1 S_1 \tan\left(\frac{k_1 l_b}{2}\right) \quad (1)$$

$$Z_{b2} = \frac{\rho_1 c_1 S_1}{j \sin(k_1 l_b)} \quad (2)$$

$$Z_{c1} = j\rho_c c_c S_1 \tan\left(\frac{nk_l}{2}\right) \quad (3)$$

$$Z_{c2} = \frac{\rho_c c_c S_1}{j \sin(nk_l)} \quad (4)$$

$$Z_{f1} = -j \frac{\rho_2 c_2 S_1}{k_2 l_f} \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}} - 1 \right) - j\rho_2 c_2 S_1 \cot(k_2 l_f) + j \frac{\rho_2 c_2 \sqrt{S_1 S_2}}{\sin(k_2 l_f)} \quad (5)$$

$$Z_{f2} = j \frac{\rho_2 c_2 \sqrt{S_1 S_2}}{\sin(k_2 l_f)} - j\rho_2 c_2 S_2 \cot(k_2 l_f) - j \frac{\rho_2 c_2 S_2}{k_2 l_f} \left(\sqrt{\frac{S_1}{S_2}} - 1 \right) \quad (6)$$

$$Z_{f3} = (\rho_2 c_2 \sqrt{S_1 S_2}) / (j \sin k_2 l_f) \quad (7)$$

$$R_s = \rho_0 c_0 S_2 \left[1 - \frac{2J_1(2ka)}{2ka} \right] \quad (8)$$

$$X_s = j\rho_0 c_0 S_2 \frac{K_1(2ka)}{2(ka)^2} = j\rho_0 c_0 S_2 \frac{2H_1(2ka)}{2ka} \quad (9)$$

K_1 和 H_1 都可以表示一阶斯特鲁夫函数，它们的关系是： $K_1(z) = zH_1(z)$

数学表达式(1)~(9)及图 2 中各参数含义如下：

R_s 、 X_s 分别是辐射阻与辐射抗，依据公式(8)、(9)计算^[9]，其中的函数分别为：

一阶贝塞尔函数：

$$J_1(Z) = \frac{Z}{2} \left[1 - \frac{1}{2!} \left(\frac{Z}{2} \right)^2 + \frac{1}{2!3!} \left(\frac{Z}{2} \right)^4 - \dots \right] \quad (10)$$

一阶斯特鲁夫函数：

$$H_1(Z) = \frac{2Z^2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{Z^{2m+1}}{[(2m+3)!]^2} \quad (11)$$

φ 为机电转换系数， $\varphi = S_1 d_{33} / (ls_{33}^E)$ ，依据工程经验估计压电晶堆等效内阻 $R_w = 0.45R_s$ ， γ 为声场耦合系数^[9]， $\gamma = |1 + (R_s + jX_s) / (2\rho_0 c_0 S_2)|$ ，对于该模型，在低频时 γ 约为 1，在接收灵敏度谐振频率处 γ 约为 1.6。

k 、 k_1 、 k_2 分别为压电晶堆、后盖板、前盖板对应的波数。波数是对应角频率 ω 与声速 c 的比值。

后盖板选用不锈钢， ρ_1 、 c_1 、 S_1 、 l_b 分别为后盖板的密度、声速、横截面积与厚度。中间压电晶堆选用 PZT-5H， ρ_c 、 c_c 、 S_1' 、 l 、 n 分别为压电晶堆的密度、声速、横截面积、每片晶片的厚度与晶片的个数。前盖板选用硬铝， ρ_2 、 c_2 、 S_2 、 S_1 、 l_f 分别为

前盖板密度、声速、外侧面积、内侧面积与厚度。 a 为前盖板喇叭口半径, b 为前盖板喉部半径和后盖板半径。 P 为水对换能器施加的声压。

这里给出主要的尺寸参数: 辐射面半径 $a=0.025$ m, 辐射头厚度 $l_f=0.01$ m, 压电晶片每片厚度 $l=0.0078$ m, $n=6$, 晶片半径 $b=0.0125$ m, 后盖板半径 $b=0.0125$ m, 后盖板厚度 $l_b=0.0128$ m。

利用串并联法从声压源出发计算 Z_{c2} 支路的电流 I_2 , 由变压比算出静态电容两端的开路电压:

$$V=I_2\varphi/(j\omega C_0) \quad (12)$$

由接收灵敏度定义计算灵敏度:

$$M=V/P \quad (13)$$

令:

$$Z_{m1}=\frac{\left(\frac{Z_{b1}Z_{b2}}{Z_{b1}+Z_{b2}}+Z_{c1}+Z_{b1}\right)\left(Z_{c2}+\frac{\varphi^2}{j\omega C_0}\right)}{\frac{Z_{b1}Z_{b2}}{Z_{b1}+Z_{b2}}+Z_{c1}+Z_{b1}+Z_{c2}+\frac{\varphi^2}{j\omega C_0}}+Z_{f1}+Z_{c1} \quad (14)$$

$$Z_{m2}=Z_{f3} \quad (15)$$

$$Z_m=\frac{Z_{m1}Z_{m2}}{Z_{m1}+Z_{m2}}+X_s+R_s+Z_{f2}+R_w \quad (16)$$

则

$$I=PS_2\gamma/Z_m \quad (17)$$

$$I_2=I\cdot\frac{Z_{m1}}{Z_{m1}+Z_{m2}}\cdot\frac{\frac{Z_{b1}Z_{b2}}{Z_{b1}+Z_{b2}}+Z_{c1}+Z_{b1}}{\frac{Z_{b1}Z_{b2}}{Z_{b1}+Z_{b2}}+Z_{c1}+Z_{b1}+Z_{c2}+\frac{\varphi^2}{j\omega C_0}} \quad (18)$$

再代入式(12)、(13), 最后利用式(19)^[2]:

$$M_u=20\lg M-120 \quad (19)$$

代入材料参数和几何尺寸并利用 Matlab 软件对上述公式进行数值计算, 可得到接收灵敏度曲线, 如图 3 所示。

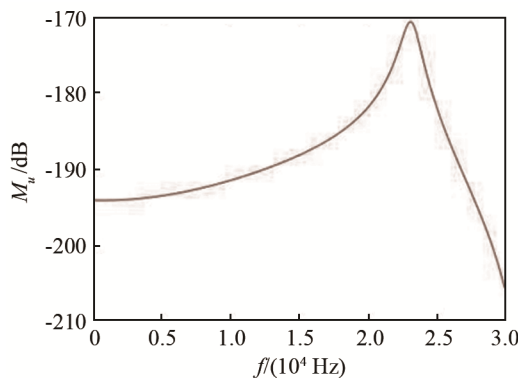


图 3 等效电路理论计算的接收灵敏度曲线

Fig.3 Frequency response curve of receiving sensitivity calculated by equivalent circuit theory

接收灵敏度的最大值约为 -170.7 dB, 在 $200\sim 10\ 800$ Hz 频段内, 接收灵敏度起伏小于等于 3 dB。

计算导纳曲线需要忽略图 2 中的 $PS_2\gamma$, 然后从变压器两端出发, 同样利用串并联法计算等效机械阻抗 Z 。根据电导纳公式:

$$Y=1/Z=G+Bj \quad (20)$$

可得到该模型的导纳曲线, 分别取实部虚部得到电导 G 、电纳 B 。利用 Matlab 作图得到电导电纳曲线。如图 4 所示, 本理论模型在有辐射阻抗以及辐射面加载水的情况下, 一阶纵振频率大概在 $20\ 750$ Hz 处, 最大电导值为 0.711 mS。

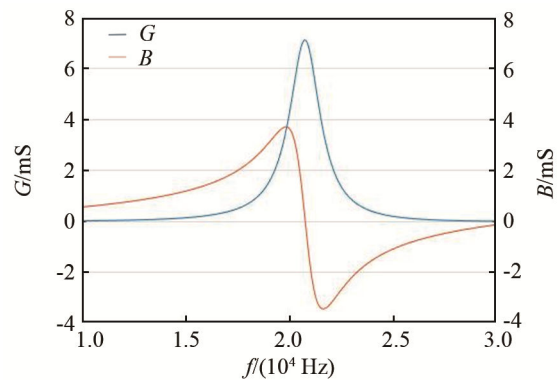


图 4 水听器在水中的电导、电纳曲线

Fig.4 The conductance and susceptance curves of the hydrophone in water

2 利用 ANSYS 有限元分析纵振复合棒式水听器的性能参数

ANSYS 是目前较为流行的有限元仿真软件, 在水听器的设计上, 该软件提供了多种单元类型, 用于分析结构应力、压电、多物理场耦合等^[8]。

ANSYS 在处理结构力学线性问题时所依赖的有限元方程如下:

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=F \quad (21)$$

上式中 $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 分别为振动位移向量、振速向量、振动加速度向量。 M 、 C 、 K 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, 在结构参数(包括几何参数和材料参数)给定及有限元网格生成后, M 、 C 、 K 已经完全唯一确定; F 是载荷力向量, 它的不同特征决定了不同分析类型。

如果 $F=\{Fe^{j\theta}\cdot e^{j\omega t}\}$ 是时间的简谐函数, 则对应的分析类型为谐响应分析, 依赖的方程可化为

$$(-\omega^2 M+j\omega C+K)u=\{F_0 e^{j\theta}\} \quad (22)$$

如果 $F=0$, 则属于模态分析, 即式(23)有非零解的本征值。

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=0 \quad (23)$$

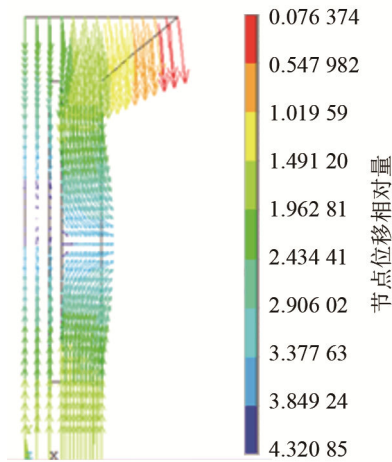
2.1 模态分析

本文利用 ANSYS 对纵振复合棒式水听器进行

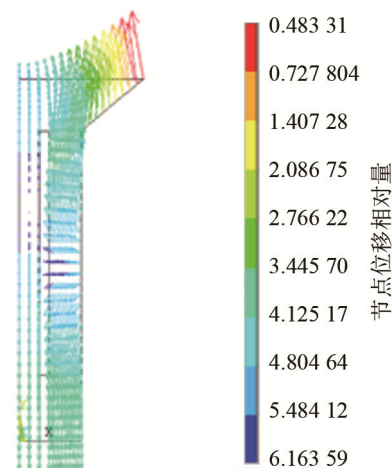
模态分析, 这里只给出在短路恒压状态和开路恒流状态下的模态分析结果, 如图 5 所示。图 5 表明了纵振复合棒式水听器的一阶纵向谐振模态振型和一阶纵向反谐振模态振型。

为计算方便, 模态分析只建立了二分之一轴对称模型, 主要包括前盖板、压电晶堆、后盖板、螺栓 4 个部分。材质分别选用硬铝、PZT-5H、不锈钢、45#钢。压电晶堆和金属部分赋予的单元类型分别为 Plane 42 和 Plane 13。压电晶堆的材料参数包括介电常数矩阵、刚度矩阵、压电应力常数矩阵及密度。金属部分材料参数包括密度、泊松比和杨氏模量。

由模态分析计算得到, 纵振复合棒式水听器一阶纵向谐振频率与一阶纵向反谐振频率分别为 20 370.1 Hz 和 26 810.4 Hz。考虑到工程实际情况, 水听器的接收灵敏度最大值应该在反谐振频率附



(a) 一阶纵向谐振模态



(b) 一阶纵向反谐振模态

图 5 纵振复合棒式水听器一阶纵向谐振模态与一阶纵向反谐振模态

Fig.5 The first-order longitudinal resonance mode and the first-order longitudinal anti-resonance mode of the longitudinal vibration low-frequency piezoelectric hydrophone

近, 如果需要其工作频率在较低频段并且保证接收灵敏度曲线足够平坦, 其工作频率的上限保守估计应不大于反谐振频率的 1/3。由模态分析得到的一阶纵向反谐振频率, 可粗略地将谐振分析的频率范围定为 0~40 000 Hz。

2.2 谐响应分析

建立水中的有限元模型, 将六片压电片正极和负极上的所有节点各定义一个耦合部, 即电压耦合, 使正极或负极上的所有节点电势相同, 并在正极与负极上分别施加 1 V 与 0 的电压载荷。在前盖板与近水场接触面施加流固耦合界面。水中有限元模型如图 6 所示。

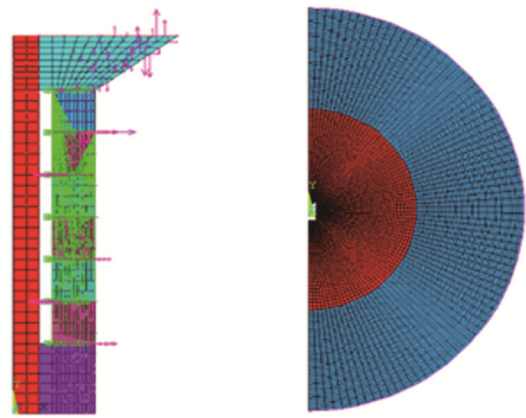


图 6 水听器有限元模型

Fig.6 The finite element model of hydrophone

在 0~40 000 Hz 频率范围内进行谐响应分析, 求解后在电压耦合点提取电荷 (Q) 和距离声中心 1 m 处提取声压 p_a 。由式(24)~(26)^[10]计算接收灵敏度 (M_u) 曲线, 如图 7 所示。

$$I = j\omega Q \quad (24)$$

$$L_{SI} = \text{Re} \left(20 \log \frac{p_a r_a}{I} + 120 \right) \quad (25)$$

$$M_u = L_{SI} + 20 \log \frac{2}{\rho f} - 240 \quad (26)$$

其中, 电荷对时间求导可得到电流 I , ω 为角频率, j 为虚部, L_{SI} 为水听器发射电流响应, p_a 为距离声中心 r_a 处的声压 ($r_a = 1$ m), M_u 为接收灵敏度, ρ 为水密度, f 为频率。

从图 7 中可看出接收灵敏度最大值约为 -170.5 dB。观察较低频段, 曲线一定程度上保持平坦, 大约在 200~5200 Hz 频段内, 接收灵敏度起伏小于等于 3 dB。

在水中做谐响应分析, 可分析出水听器的导纳特性并与等效电路法相比较。在压电晶堆表面正极与负极分别定义电压耦合部, 并在正极与负极上分别施加 1 V 与 0 的电压载荷, 求解后提取正极耦合

部序号最低节点上的电荷,在时间后处理中求出电导电纳曲线。在水中的电导电纳曲线如图 8 所示。此外,还得到水听器在水中的电阻电抗曲线,如图 9 所示。

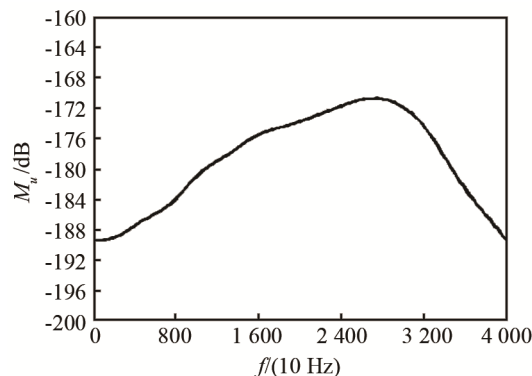


图 7 基于 ANSYS 仿真得到的接收灵敏度曲线

Fig.7 The frequency response curve of receiving sensitivity by ANSYS simulation

从水中的电导电纳曲线(图 8)可知,电导最大值约为 0.80 mS,此处的频率即为一阶纵向谐振频率,约为 20 600 Hz。根据图 9,电阻电抗曲线只展现出水听器在水中的一阶反谐振特性,当电阻(R)取极大值时,该点所处频率对应水听器的接收灵敏度曲

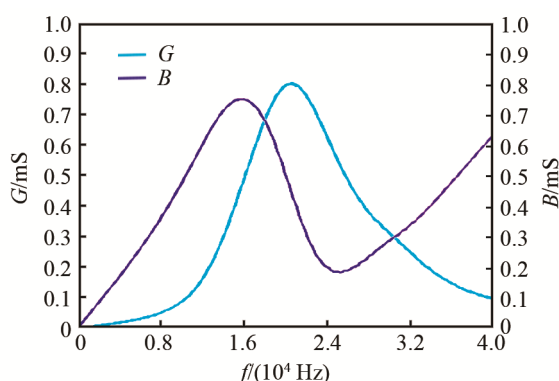


图 8 基于 ANSYS 仿真的换能器在水中的电导、电纳曲线

Fig.8 The ANSYS simulated conductance and susceptance curves of the hydrophone in water

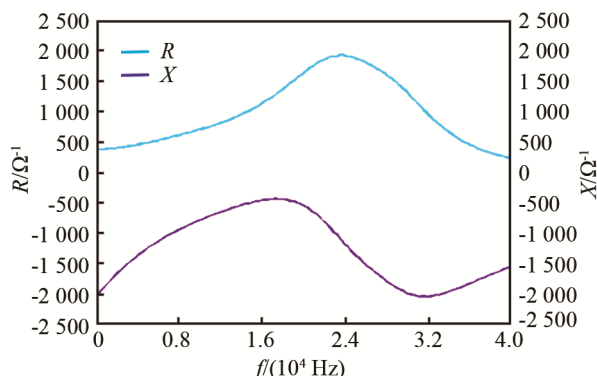


图 9 基于 ANSYS 仿真的换能器在水中的电阻、电抗曲线

Fig.9 The ANSYS simulated resistance and reactance curves of the hydrophone in water

线的峰值所处频率,即一阶纵向反谐振频率。观察电抗(X),存在一个波峰和一个波谷,波峰对应的频率为 f_1 ,波谷对应的频率为 f_2 , $f_2 - f_1$ 与水听器接收灵敏度反谐振频率处的 -3 dB 带宽大致吻合。通过观察 R 与 X ,说明接收灵敏度曲线和阻抗曲线在峰值段趋势差不多。

3 对比与分析

通过对比接收灵敏度曲线(图 3 与图 7),发现通过等效电路理论与基于 ANSYS 仿真得到的接收灵敏度最大值分别为 -170.7 dB 和 -170.5 dB,它们对应的频率分别约为 23 100 Hz 和 27 400 Hz,有 15.7% 的误差。考虑两者带内起伏小于 3 dB,分别在 200~10 800 Hz 与 200~5 200 Hz 频段内有较为平坦的响应。对比导纳特性(图 4 与图 8),两种方法得到的电导最大值以及所对应的一阶纵向谐振频率存在微小差异,一阶纵向谐振频率分别约为 20 750 Hz 与 20 600 Hz。

造成上述差异的原因可能为:

(1) 从纵振复合棒式水听器的结构上进行分析,水听器的结构包含前盖板、压电晶堆、后盖板、预应力螺栓,其中前盖板、压电晶堆和后盖板的中间都存在孔洞,用于安装预应力螺栓(见图 1),然而在等效电路理论中无法考虑这个因素,且直接忽略了螺栓结构(见图 2)。即等效电路理论是将水听器各个部分先看成实心结构,再通过机电类比等效成完全理想的电路元件。该理想模型中只有前盖板外侧与水接触,其余部分与空气接触,水对前盖板的作用可等效为 $PS_2\gamma$,是一个理想的一维纵向模型。而在有限元分析中,有限元模型(见图 6)已经较为接近实际模型,模型包括前盖板、压电晶堆、后盖板、预应力螺栓。为计算简便忽略了每个部件的连接部位。

(2) 等效电路理论只考虑水听器一维纵向振动,忽略了其它模态。但通过有限元分析(见图 5)可看出,水听器不仅有纵向振动,还包含前盖板、压电晶堆、螺栓的弯曲振动,考虑了整个结构体的纵向横向振动耦合。

(3) 有限元分析中,水听器前盖板与近水场接触面施加了流固耦合界面,而等效电路理论中并未考虑此因素。

(4) 等效电路理论中,水听器的辐射阻抗是理论计算的结果。有限元分析中,谐响应分析中输入的阻尼系数只是经验值,对于实际环境必然存在误

差。无论是等效电路理论还是有限元分析, 对于水听器的工作环境都进行了理想化。

4 结 论

本文通过以上分析, 得到以下结论:

(1) 等效电路理论只考虑一维纵向振动, 将结构件等效为实心体。该水听器模型通过计算接收灵敏度和导纳特性发现, 接收灵敏度最大值约为 170.7 dB, 对应的频率约为 23 100 Hz, 接收灵敏度在 200~10 800 Hz 频段内起伏 ≤ 3 dB。

(2) 利用 ANSYS 有限元仿真, 由模态分析得到水听器的一阶纵向谐振频率与一阶纵向反谐振频率分别为 203 70.1 Hz 和 268 10.4 Hz, 计算导纳特性, 电导最大值所在频率与一阶纵向谐振频率相同, 由谐振分析得到的接收灵敏度曲线在一阶纵向反谐振频率附近存在峰值, 约为-170.5 dB。大约在 200~5 200 Hz 频段内, 接收灵敏度曲线起伏小于 3 dB。当电阻(R)取极大值时, 该点所处频率对应水听器的接收灵敏度曲线的峰值所处频率, 即一阶纵向反谐振频率。此外, 电抗曲线中波峰波谷对应的频率之间的带宽与水听器接收灵敏度反谐振频率处的-3 dB 带宽大致吻合。

(3) 由等效电路理论和 ANSYS 有限元仿真得到的接收灵敏度最大值对应的频率分别在 231 00 Hz 和 27 400 Hz 处, 有 15.7%的误差, 并且接收灵敏度在数值上存在差异。两种方法计算出的导纳曲线中, 一阶纵向谐振频率分别约为 20 750 Hz 与 20 600 Hz。

(4) 等效电路理论将模型理想化, 只考虑一维纵向振动, 只有前盖板与水接触, 并将水对前盖板的作用等效为 $PS_2\gamma$ 。ANSYS 有限元仿真在建模、模态分析、边界条件施加方面更接近实际情况, 考虑水听器的纵向横向模态耦合以及前盖板与近水场接触面之间施加流固耦合界面, 相比等效电路理

论更符合实际情况。但是 ANSYS 有限元仿真中, 建模、边界条件、材料属性、阻尼系数等参数的设置都会影响仿真的准确性, 所以还需要在后续的研究中制作实物, 用实测结果来比对。等效电路理论中材料参数与结构参数都体现在数学公式中, 从理论上可以直观地表达各个结构件的物理意义, 可以为水听器设计和有限元仿真提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] 莫喜平. 功能材料及其应用于换能器技术的研究进展[J]. 物理, 2009; 38(3): 149-156
MO Xiping. Functional materials and their research progress in transducer technology[J]. Physics, 2009, 38(3): 149-156.
- [2] 周福洪. 水声换能器及基阵[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 7-8, 63-72
ZHOU Fuhong. Hydroacoustic transducer and array[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984: 7-8, 63-72.
- [3] WORCESTER P F. Deep-water ocean acoustic propagation: observations[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2015, 138(3): 1842.
- [4] WUNSCH C. Ocean acoustic tomography: past, present, and maybe future[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2015, 138(3): 1818.
- [5] WALKER D A. Deep ocean seismology[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1984, 65(1): 2-3.
- [6] SONG H C. Diversity combining for long-range acoustic communication in deep water using a towed array[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 132(2): 68-73.
- [7] 桑永杰. 低频宽带水声换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014: 34.
SANG Yongjie. Low frequency broadband underwater acoustic transducer research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014: 34.
- [8] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1280-1290.
MO Xiping. Application of ANSYS software in simulation analysis of acoustic transducer[J]. Acoustic Technology, 2007, 26(6): 1280-1290.
- [9] 何作镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 245-246, 329-332
HE Zuoyong, ZHAO Yufang. Acoustic theory foundation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 245-246, 329-332.
- [10] 刘爽. 新型矢量水听器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016: 65.
LIU Shuang. New vector hydrophone research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016: 65.