压电水声换能器的声学特性分析

余南辉[1]，范吉军[2]，JaeHwan Kim[3]，HeungSoo Kim[3]
(1. 武汉工业学院机械工程系，武汉 430023；2. 武汉工业学院数理系，武汉 430023；3. 仁荷大学机械工程系，仁川，韩国)

摘要:压电水声换能器是一种既能作为驱动器又能作为传感器工作的水下探测装置。准确预测其在嘈杂水下环境中的声学特性对设计出坚固耐用的换能器是十分重要的。有限元方法对分析换能器在不同环境中的各种性能十分有效和实用。建立了一种 Tonpilz 型换能器的二维轴对称有限元模型，设计了基于有限元方法的程序，对其进行了动力学分析，包括模态分析和谐响应分析等，获得了一些声学特性。该程序分析的结果与 ANSYS 软件分析的结果显示出较好的吻合性。

关键词：有限元方法；压电材料；Tonpilz 型换能器；声学特性
中图分类号：TB565 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-02-0191-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.22

Dynamic analysis of piezoelectric underwater acoustic transducer

YU Nan-hui[1], FAN Ji-jun[2], JaeHwan Kim[3], HeungSoo Kim[3]
(1. *Department of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan* 430023, *China;*
2. *Department of Mathematics and Physics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan* 430023, *China;*
3. *Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon, Korea*)

Abstract: Piezoelectric underwater acoustic transducer is a kind of device for underwater detection working as not only an actuator but also a sensor. The technique of predicting acoustical characteristics of transducer is important to robust design of transducer in harsh underwater environment. Finite element methods are very powerful to characteristic analysis of transducers in different environments. Two dimensional axisymmetric finite element model of one type of Tonpilz transducer is generated and the dynamic analysis of it is conducted through a developing program based on finite element method. Some acoustic characteristics are obtained, and parts of them are compared with those from ANSYS.
Key words: finite element method; piezoelectric material; Tonpilz transducer; acoustic characteristics

1 引 言

水声换能器在水声工程中起着关键作用，近年来随着科技的迅速发展，新型换能器材料的不断开发以及新的分析方法在换能器设计上的应用，使得换能器的研究与设计出现了许多新概念和新方法[1]。压电材料作为一种智能材料广泛应用于机电领域，如压电陶瓷变压器[2]、声纳换能器等。压电水声换能器是一种水下探测装置，它既可作为驱动器也可作为传感器进行工作。在大部分的水下探测应用中，压电换能器呈现出很好的综合效能：工作效率高，设计灵活多变，性价比高。如能准确预先计算其在嘈杂水下环境中声学参数对设计出坚固耐用的换能器是十分重要的。有限元方法(简称 FEM)可广泛应用于工程分析[3]，它能分析换能器在不同环境下(如：在空气中或在水中)的性能。文中建立了一种 Tonpilz 型换能器的二维轴对称有限元模型，可进行模态、水中谐响应和导纳分析。分析工具采用一种基于有限元方法开发的水下传感器分析程序(简称 USAP)。该程序对分析在水中工作的换能器参数非常实用，只要准备好必要的输入文件并选择分析类型，就能做出相应的分析。

收稿日期：2008-04-20；**修回日期**：2008-07-14
基金项目：湖北省自然科学基金资助项目(2007ABA086)
作者简介：余南辉(1980-)，女，湖北武汉人，硕士，助教，研究方向为机械设计与智能结构。
通讯作者：余南辉，E-mail: nanhui_yu@hotmail.com

2 理论分析

2.1 换能器在水中工作环境的描述

图 1 显示的是换能器在水中的工作环境。换能器可用弹性和智能材料的组合体来表示。在换能器周围包含了有限水域，同时考虑了不同的边界及工作条件。在有限水域的最外围设置了无限流体边界使其更接近真实的工作状态。由此，所涉及的理论分析包括流体与固体结构耦合和压电材料中电与结构之间的耦合。

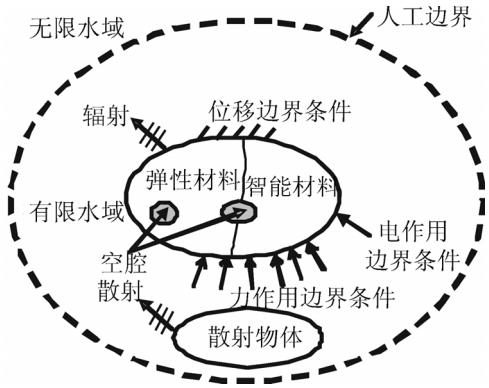


图 1 水声换能器工作环境示意图

Fig.1 Schematic diagram of underwater acoustic transducer

2.2 流-固耦合场的有限元分析

进行固体结构在流体环境中的谐响应分析必然涉及到固体结构和流体之间的相互作用。假设此固体结构为弹性体，其行为特征符合弹性力学理论[4]。假设流体为可压缩的(即密度随压力的改变而变化)、非粘性的(即没有粘性耗散)和不可流动的介质，且其平均密度和压力在所分析的流域中保持均匀一致，则满足相应的波动方程[5]。

对于固体结构的有限元分析，其方程为：

$$\boldsymbol{M}\ddot{U}+\boldsymbol{C}\dot{U}+\boldsymbol{K}U-\boldsymbol{Q}P=\boldsymbol{f} \tag{1}$$

该方程考虑了在流-固界面上将流体的压力载荷加到固体结构接触面上。式中 U 为节点位移；P 为节点流体压力；$\boldsymbol{M}$ 为结构的质量矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为结构的阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}$ 为结构的刚度矩阵；$\boldsymbol{Q}$ 为流－固界面上的耦合面积矩阵；$\boldsymbol{f}$ 为固体结构上所受力矢量。

对于流体的有限元分析，基于变分原理或加权余量法(即伽辽金法)，可将波动方程进行标准的有限元离散化[3]，最终得到流体有限元控制方程为

$$\boldsymbol{E}\ddot{P}+\boldsymbol{A}\dot{P}+\boldsymbol{H}P+\rho\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\ddot{U}=0 \tag{2}$$

该方程考虑了流-固界面上连续性要求和由于阻尼而产生的能量损失。式中 $\boldsymbol{E}$ 为流体的惯性矩阵；$\boldsymbol{A}$ 为流体的阻尼矩阵；$\boldsymbol{H}$ 为流体的刚度矩阵；ρ 为流体的密度；右上标 T 为矩阵的转置。

式(1)、(2)给出了流-固耦合方程，组合起来可写成如下形式：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M} & \boldsymbol{0}\\ \rho\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{E}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{U}\\ \ddot{P}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{C} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}\\ \dot{P}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{K} & -\boldsymbol{Q}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{H}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U\\ P\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_1\\ \boldsymbol{f}_2\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{f}_1$ 为作用于流-固界面上的结构力矢量；$\boldsymbol{f}_2$ 为由初始波力(波浪力)场引起的作用于流-固界面上的力矢量。

由于位移可以看作速度势的梯度，那么通过式(4)可以得到与式(3)对应的流-固有限元耦合方程的另外一种表达形式(式(5))[5-8]。

$$\begin{aligned}u&=\nabla\phi\\ p&=-\rho\dot{\phi}\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & -\rho\boldsymbol{E}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{U}\\ \ddot{\Phi}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{C} & \rho\boldsymbol{Q}\\ \rho\boldsymbol{Q} & -\rho\boldsymbol{A}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}\\ \dot{\Phi}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & -\rho\boldsymbol{H}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U\\ \Phi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_1\\ \boldsymbol{g}_2\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 u 为位移；ϕ 为速度势；∇ 为梯度；p 为流体压力，Φ 为节点的速度势；$\boldsymbol{g}_2=\int_0^t \boldsymbol{f}_2\mathrm{d}t$ [5,6,7,8]。

2.3 电-结构耦合场的有限元分析

压电水声换能器用的是压电材料，因此了解其工作原理非常重要。基于准静态假设，也就是电场必须和弹性位移场互相平衡，可以得到关于压电材料的线性本构方程

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}&=\boldsymbol{c}^{\mathrm{E}}\boldsymbol{S}-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_V\\ \boldsymbol{D}&=\boldsymbol{e}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{S}}\boldsymbol{E}_V\end{aligned} \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{T}$ 为应力场；$\boldsymbol{D}$ 为电位移；$\boldsymbol{S}$ 为应变场；$\boldsymbol{E}_V$ 为电场；$\boldsymbol{e}$ 为压电耦合常数矩阵；$\boldsymbol{\varepsilon}^{S}$ 为介电常数矩阵；$\boldsymbol{c}^{E}$ 为压电材料的弹性刚度矩阵。

已知电场 $\boldsymbol{E}_V$ 与电势 ϕ_{E} 之间的关系为：

$$\boldsymbol{E}_V=-\nabla\phi_E \tag{7}$$

将式(6)与(7)相结合，然后进行有限元的离散化，可得到关于压电材料中电-结构耦合问题的有限元方程：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{UU} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{U}\\ \ddot{\Phi}_E\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{D}_{UU} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}\\ \dot{\Phi}_E\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{UU} & \boldsymbol{K}_{U\Phi}\\ \boldsymbol{K}_{U\Phi}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{K}_{\Phi\Phi}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U\\ \Phi_E\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}\\ G\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中，Φ_E 为节点的电势；$\boldsymbol{M}_{UU}$ 为压电材料的质量矩阵；$\boldsymbol{K}_{UU}$ 为压电材料的弹性刚度矩阵；$\boldsymbol{D}_{UU}$ 为压电材料的阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{U\Phi}$ 为压电耦合矩阵；$\boldsymbol{K}_{\Phi\Phi}$ 为介电刚度矩阵；$\boldsymbol{F}$ 为总的外加力矢量；G 为总的外加电荷。

3 有限元建模和分析

3.1 Tonpilz 型换能器的有限元模型

图 2 给出了 Tonpilz 型换能器的实体示意图，它由四部分组成：头部、尾部、拉紧螺栓和压电陶瓷。两块压电陶瓷夹在头尾部之间，一个拉紧螺栓置于中心以保证各个部分的紧密接触。该换能器头部呈圆柱形，故其具有圆形的辐射表面。研究表明，换能器各部分的几何参数对它的机械品质因素存在直接影响，可通过某些方法进行优化[9]。本文中换能器各组成部分的详细尺寸和具体材料参数分别见

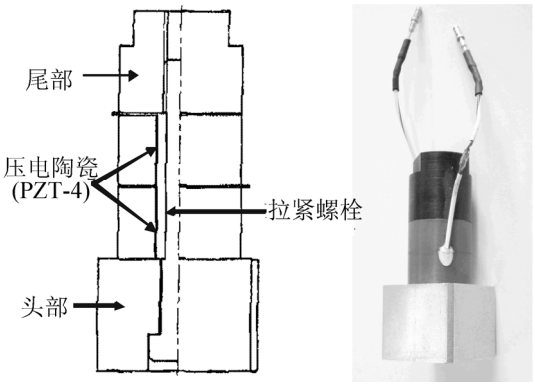


图 2　Tonpilz 型换能器的实体示意图
Fig.2　Practical model of Tonpilz

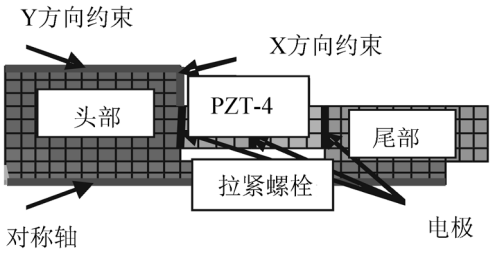


图 3　Tonpilz 型换能器的二维轴对称有限元模型
Fig.3　2-D axisymmetric finite element model of Tonpilz

表 1 和表 2。图 3 给出了 Tonpilz 型换能器的二维轴对称有限元模型及边界条件，该模型建立在 X-Y 平面上，其对称轴沿着 X 轴方向。该有限元模型采用四节点四边形轴对称单元进行网格划分，包括 193 个单元和 240 个节点。两块压电陶瓷按极性相反的方向放置，极化方向沿着换能器的纵向，可提高换能器的响应性能。三个电极放置在与压电陶瓷相关的接触面上，用来进行激励或者测量。其中 Y 方向约束的是头部的外圆柱表面，X 方向约束的是头部靠近压电陶瓷但未与电极相接触的外围端面部分，这种约束方式体现换能器在实际中的边界条件考虑为头部固定。换能器的受力方向为 X 方向，当它工作时，将在该方向上产生振动。

表 1　Tonpilz 型换能器的尺寸参数
Table 1　Dimensions of Tonpilz transducer

	尺寸/mm
头部厚度	19.4
尾部厚度	18.0
单块压电陶瓷厚度	8.0
头部外部半径	13.2
尾部外部半径	9.0
压电陶瓷外部半径	9.0
头部内部半径	2.5, 4.0
尾部内部半径	2.5
压电陶瓷内部半径	4.0
螺栓半径	2.5, 4.0

表 2　Tonpilz 型换能器各组成部分的材料参数
Table 2　Material properties of the parts in the Tonpilz transducer

	杨氏模量/Pa	密度(kg/m^3)	泊松比
头部	70.3E9	2770	0.33
尾部	206.0E9	7955	0.30
螺栓	185.0E9	7920	0.30
压电陶瓷		PZT-4	

3.2　Tonpilz 型换能器的模态分析

表 3 列出了 Tonpilz 型换能器在短路状态下进行模态分析所得前 5 阶自然频率，并将 USAP 的分析结果和 ANSYS 的分析结果进行了比较。图 4 给出了前 3 阶自然频率模态振型的对比。由此可以看出，USAP 与 ANSYS 的分析结果具有很好的吻合性。

表 3　Tonpilz 型换能器模态频率计算结果 (短路状态)
Table 3　Modal analysis result of Tonpilz (short circuit)

阶数	模态频率/Hz		相对误差/%
	USAP	ANSYS	
第 1 阶	18833	18639	1.04
第 2 阶	38050	36424	4.46
第 3 阶	48739	48123	1.28
第 4 阶	59326	58602	1.23
第 5 阶	80681	77311	4.36

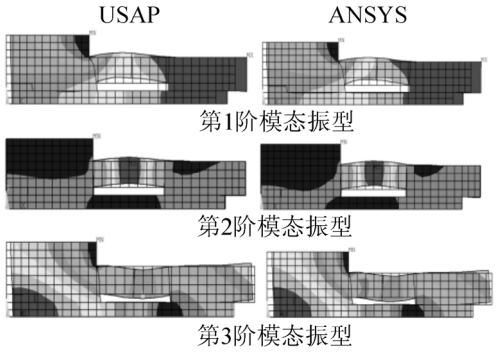


图 4　模态振型分析结果(短路状态)及比较
Fig.4　Mode shape comparison (short circuit)

3.3　Tonpilz 型换能器在水中的谐响应分析

图 5 给出了 Tonpilz 型换能器在水中的二维轴对称模型，同样采用 4 节点四边形轴对称单元进行划分，具有 383 个单元和 444 个节点。Tonpilz 型换能器的具体结构和边界条件与图 3 所示相同。在图 5 的模型中，Tonpilz 型换能器的头部与拉紧螺栓的前端面和水相接触。进行谐响应分析时，中间电极上设置幅值为 1V 的正弦变化电压，其余两个电极为 0V 电压，分析的频率范围设置为 10000Hz~50000Hz。

通过谐响应分析，Tonpilz 型换能器在水中发射电压响应(简称 TVR)和压力分析结果如图 6 所示。节点 419 选作要进行分析的计算点。分析图 6 可得

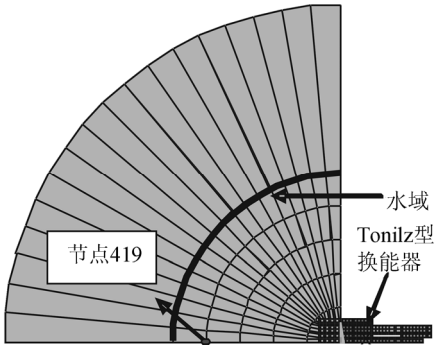


图 5 Tonpilz 型换能器在水中的二维轴对称有限元模型
Fig.5 2-D axisymmetric finite element model of Tonpilz in water

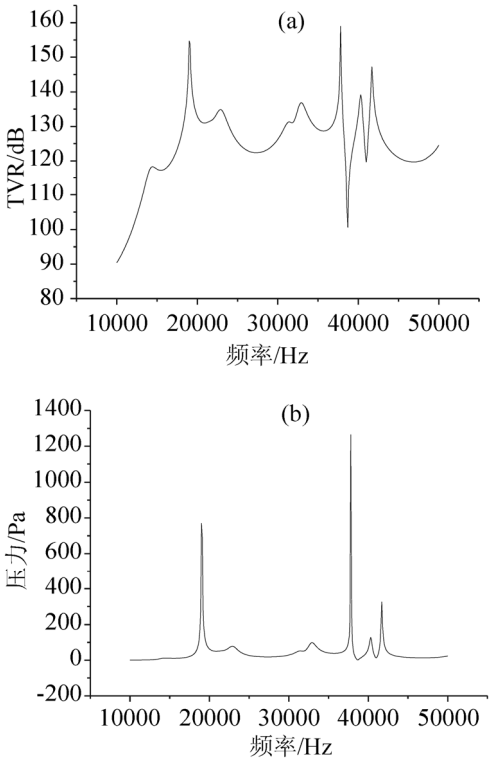


图 6 Tonpilz 型换能器在水中某点的 TVR(a)和压力(b)分析结果
Fig.6 TVR (a) and pressure (b) of Tonpilz in water

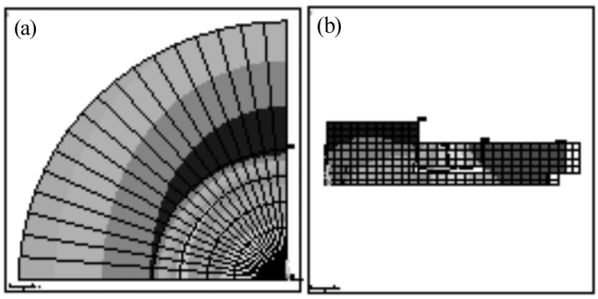


图 7 第一阶谐振频率处的水中压力分布(a)
和 Tonpilz 型换能器的变形(b)
Fig.7 Pressure distribution in water (a) and deformed shape of Tonpilz (b) at first natural frequency

其第一阶谐振频率在 19045Hz 附近。在该频率处，水中的压力分布以及 Tonpilz 型换能器的变形见图 7。

3.4 Tonpilz 型换能器在水中的导纳分析

导纳或者阻抗也是换能器的重要特征参数，它是换能器的力学特性和声学特性的函数，是分析研究换能器性能的一种有效方法[10]。经过分析，此处的导纳是一个复数量，表达形式如下：

$$Y=G+\mathrm{i}B \tag{9}$$

式中，Y 为导纳；G 为电导；B 为电纳。分析时在中间电极上设置 1V 电压，其余两个电极为 0V 电压。计算后得到 Tonpilz 型换能器在水中电导和电纳的分析结果如图 8 所示，电导和电纳均在谐振频率处出现峰值。

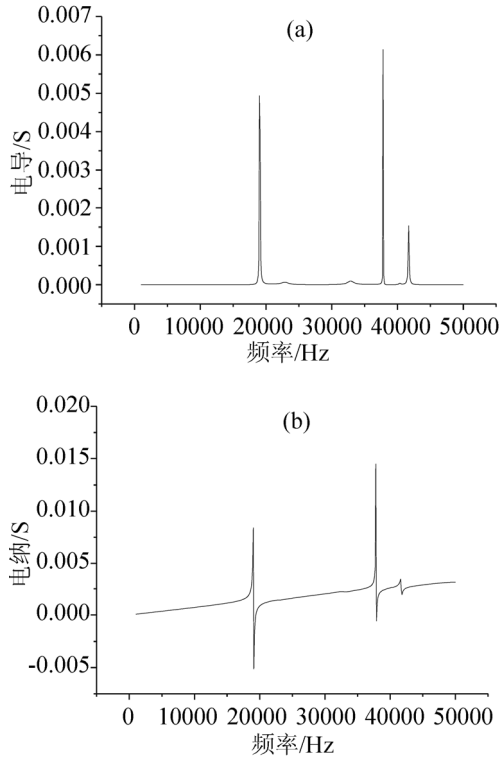


图 8 Tonpilz 型换能器在水中的电导(a)和电纳(b)
Fig.8 Conductance (a) and susceptance (b) of Tonpilz

4 结束语

有限元法对分析压电水声换能器的声学参数十分有效和实用。本文建立的 Tonpilz 型换能器轴对称有限元模型并利用 USAP 程序进行了动力学(包括谐响应和模态等)分析。所得结果较合理地描述了此类型水声换能器的声学参数。模型的建立和分析尚存在一些不足，仍有待进一步改进和完善。

参 考 文 献

[1] 王炳辉, 陈敬军. 声纳换能器的新进展[J]. 声学技术, 2004, **23**(1): 67-69.
Wang Binghui, CHEN Jingjun. Recent developments of sonar transducers[J]. Technical Acoustics, 2004, **23**(1): 67-69.

[2] 黄以华, 周康源, 陈昕, 等. 压电陶瓷变压器的发展——回顾与展望[J]. 声学技术, 2002, **21**(3): 122-127.

HUANG Yihua, ZHOU Kangyuan, CHEN Xin, et al. The development of piezoelectric transformer——review and expectation[J]. Technical Acoustics, 2002, **21**(3): 122-127.

[3] Bathe K J. Finite element procedures[M]. Prentice-Halll Inc, 1996.

[4] 王润富，陈国荣．弹性力学及有限单元法[M]．北京：高等教育出版社, 2005.
WANG Runfu，CHEN Guorong. Elasticity and finite element method[M]. Beijing: High Education Press, 2005.

[5] 马大猷．现代声学理论基础[M]．北京：科学出版社, 2004.
MA Dayou. Fundamentals of modern acoustic theory[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[6] 王治国．MSC.ACTRAN 工程声学有限元分析理论与应用[M]．北京：国防工业出版社, 2007.
WANG Zhiguo. MSC.ACTRAN Finite element analytical theory and application of engineering acoustics[M]. Beijing：National Defence Industry Press, 2007.

[7] Everstine G C. Finite element formulations of structural acoustics problems[J]. Computers & Structures, 1997, **65**(3): 307-321.

[8] 邢景堂，周盛，崔尔杰．流固耦合力学概述[J]．力学进展，1997，**27**(1): 19-38.
XING Jingtang, ZHOU Sheng, CUI Erjie. Introduction to fluid-structure interaction mechanics[J]. Advances in Mechanics, 1997, **27**(1): 19-38.

[9] 滕舵，陈航，张允孟．宽带纵振 Tonpilx 型水声换能器的优化设计[J]．声学技术, 2005, **24**(1): 58-60.
TENG Duo, CHEN Hang, ZHANG Yunmeng. Optimization design of broadband longitudinal Tonpilz underwater acoustic transducers[J]. Technical Acoustics, 2005, **24**(1): 58-60.

[10] 禹建．水声换能器基阵互辐射阻抗研究[J]．声学技术，2008，**27**(6): 917-921.
YU Jian. Research on mutual radiation impedance of underwater acoustic array[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(6): 917-921.