Acoustic Vibration Coupling Simulation Technology for MEMS Acoustic Sensor Package

SHI Jingjing[1], *HUANG Xiaodong*[1*], *ZHU Ming*[2], *LIU Wen*[2*]
(1.*Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education*, *Southeast University*, *Nanjing* 210096, *China*;
2.*Siemens Industry Software*(*Beijing*) *Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100102, *China*)

Abstract: A acoustic vibration coupling simulation technology for the package structures of MEMS vector hydrophone is presented by using an acoustic simulation software, to reveal the impact of sensor packaging on the key performance of the sensor and the sound field distribution underwater. Firstly, the encapsulation model of sensor was established, and the influence of the package structure analyzed on the modal and bandwidth. Then the distribution of sound field in space was studied to calculate the attenuation of the sound source signal after it has passed through the package, about 0.5 dB. Finally, comparison of the effects of different package structure materials on the sensor performance showed the conclusion that first-order resonance frequency and sound field attenuation is a pair of inherent contradictions, and this conclusion will provide guidance for optimizing sensor package design.

Key words: MEMS vector hydrophone; finite element method; acoustic vibration coupling; package
EEACC: 7210 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.01.015

针对 MEMS 水声传感器封装的声振耦合仿真技术研究

石晶晶[1], 黄晓东[1*], 朱 明[2], 刘 文[2*]
(1.东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096; 2.西门子工业软件有限公司, 北京 100102)

摘 要: 提出了一种针对 MEMS 矢量水声传感器封装结构的声振耦合仿真技术, 以揭示传感器封装对带宽、灵敏度等关键性能的影响和规律以及传感器在水下的声场分布情况。建立传感器封装水下仿真模型, 分析封装结构对传感器带宽及灵敏度的影响。并研究封装内外的声场空间分布规律, 得到声源信号透过封装后的衰减损失约为 0.5 dB。比较封装材料对传感器性能的影响, 得出传感器的带宽和灵敏度为一对固有矛盾的结论, 为优化传感器封装设计提供理论指导。

关键词: MEMS 矢量水声传感器; 有限元仿真; 声振耦合; 封装
中图分类号: TP212.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2019)01-0070-06

声呐设备是水下目标探测的重要手段, 随着潜艇减振降噪技术的发展以及对水下目标距离和定位精度要求的不断提高, 对声呐设备的性能提出越来越高的要求。水声传感器是声呐系统的重要组成部分, 水声传感器的性能将直接决定声呐系统的精度和准确性[1]。1996 年, 美国学者 Howard K 为了满足美国海军需要, 将微机电系统技术(MEMS)技术应用到水声传感器的研发中, 研制出了两款 8 cm^3 微型水声传感器[2]。近年来由于 MEMS 水声传感器体积小、成本低、刚性安装等优点, 引起了国内外水声领域学者的关注[3-4], 然而目前 MEMS 水声传感器的发展仍然有一系列问题, 比如灵敏度低、响应带宽窄、抗噪声差等[5], 因此研发前期需要进行合适的仿真研究, 这对于指导和优化水声传感器的设计、缩短期间的研发周期具有重要的意义。

MEMS 水声传感器应用于水下环境中必须要能够适应水下环境的复杂性。由于海水的导电性, 传感器芯片不能直接应用于海水中, 必须对其进行绝缘封装; 其次, 为了保证传感器的灵敏度, 封装必须有良好的透声性; 另外, 考虑到传感器应用于深海环境, 封装必须能够耐高静水压等问题。同时, 由于封装结构自身的机械特性和声学特性也会影响到传感器芯片的关键性能, 因此封装技术成为进一步提高水听器性能的关键技术之一[6]。目前针对水下声学传感器封装的仿真研究大部分只考虑封装结构的固有机械特性[7-8], 大多数情况下忽略了声场和结

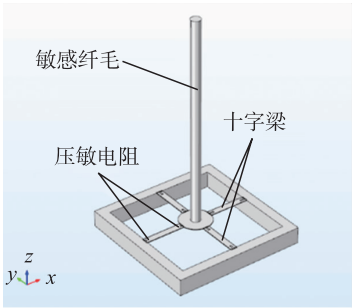
收稿日期: 2018-02-27 修改日期: 2018-04-17

构之间的耦合关系,但是在水下环境中流体对结构的相互作用比较大,必须要考虑流体和结构的耦合关系,否则计算出的结果将不准确[9]。为了解决目前针对水声传感器封装仿真过程中存在的问题,本文从提高 MEMS 矢量水声传感器的灵敏度、带宽两个关键参数入手,对传感器的封装结构进行多物理场耦合的建模和仿真分析,得到器件的模态、带宽、灵敏度等关键性能的数据,并总结出封装结构参数和材料参数对器件性能的影响规律。

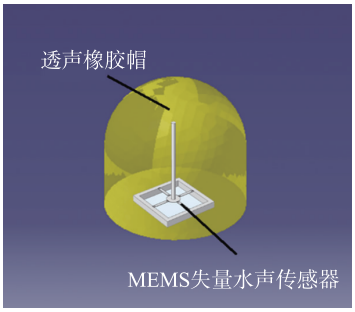
1　MEMS 矢量水声传感器工作原理

本文采用的 MEMS 矢量水声传感器内部的结构如图 1(a)所示[5],由敏感纤毛、交叉十字梁、压敏电阻和周围的支撑底座组成,在 4 根梁的两端根部附近排布 MEMS 压敏电阻,这 8 个压敏电阻连成惠斯通电桥。图 1(b)为传感器外部的封装结构示意图[10],目前一般水听器的封装都采用透声帽结构,传感器芯片被封装在充满绝缘介质的透声帽中。

当外部声源的声压通过水介质传递到封装结构表面时,引起封装结构的振动,再将声波传递到传感器内部的传声介质中。水声传感器的敏感部分是位于交叉十字梁中间的仿生纤毛结构,当纤毛受到介质中声波作用时,纤毛会带动与之相连的十字梁运动并产生形变,从而使梁上的压敏电阻阻值发生改变,由此将声信号转化为电信号。通过传感器外接的惠斯通电桥再将电阻的阻值变化量转化为电压变化量输出,通过信号处理即可得到声源的强度、方向等信息。



(a) 敏感单元结构示意图



(b) 封装结构图

图 1　MEMS 矢量水声传感器结构示意图

2　传感器封装的耦合仿真

声场问题的数值求解方法主要基于声学 Helmholtz 波动方程,在求解方程时需要根据不同的边界来确定方程的解。水声传感器在水下探测声信号时,需要同时考虑器件封装内部的声场和封装外部水域的声场。传感器的封装结构与声场相互作用,声信号传播到封装结构处,在结构上产生压力,引起结构的振动;同时封装结构的振动又会反作用于声场,引起声场的变化。该过程为典型的声振耦合作用。声波从水介质到油介质经过 3 层介质,由声学理论可以建立 3 层介质传播模型[11],但该模型成立的前提条件是该 3 层介质均为无限大的平板,且声场为自由场。对于透声帽这种尺寸远小于声波波长,形状不规则的结构,透声性能不能有简单的理论模型表述。因此,为了研究传感器封装结构的振动和声学特性,应该采用耦合声学有限元方法仿真。

2.1　耦合声学有限元仿真步骤

参考其他文献中的传感器尺寸[5],设置水声传感器内部的仿生纤毛直径约为 200 μm,封装结构透声帽的直径设计为 25 mm,由于后者尺寸约为前者的 125 倍,封装内部空间对于传感器纤毛而言可以近似为广域空间。本文建立的透声帽封装结构模型如图 2 所示,蓝色的透明球体为水域,内部的黄色区域为传感器的封装管壳。

根据图 2 的模型,利用有限元软件 ANSYS 建立透声帽封装结构的有限元网格模型,然后将网格文件导入到 Virtual Lab Acoustics 中打开并建立封装结构的水下声学仿真模型。如图 3 所示,将模型中涉及到的网格,分别定义属性为结构网格、声学网格和场点网格,传感器封装管壳网格为结构网格,定义封装内部的油腔网格和外界水环境网格(图中已隐藏)为声学网格,同时为了便于数据的提取和观察,在传感器封装内部中心点处,沿着声源传播方向定义场点网格,场点的存在不影响计算结果。

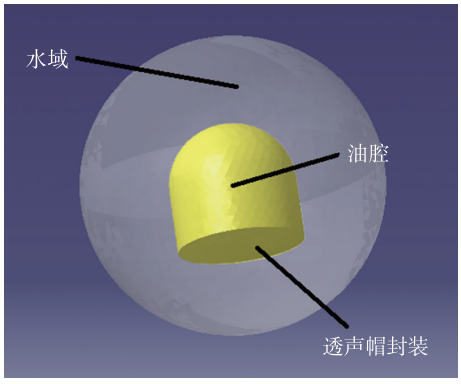


图 2　透声帽封装结构模型

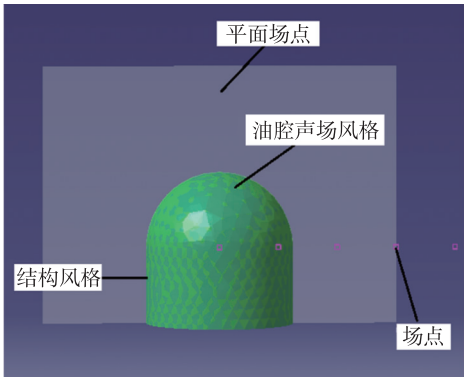


图 3 模型网格示意图

经过声学前处理生成的包络面可以将封装结构网格上的振动速度映射到声学网格上,创建振动边界条件。由于在本结构模型中,封装结构的内部和外部分别有两种不同的声传递介质,需要同时考虑结构和水域和油腔的耦合作用,因此需要对模型建立两种映射关系。仿真软件求解声场问题的思路和数学解析法是一致的,例如用分离变量法求解声散射问题时,根据求解目标的几何形状以及选取的坐标系,将入射声波和散射声波展开成与目标几何形状以及坐标系相吻合的基本波函数的级数形式,根据表面处应力连续和法向振速连续的边界条件确定散射声场级数形式解的待定系数,从而得到声场的解析解。对于有限元耦合模型,两个连续边界条件即通过两个映射关系来实现的。

2.2 封装结构参数设置

水声传感器封装模型共涉及到 3 种材料,分别为传感器的封装材料,腔内油性物质和外界的水域,封装材料和腔内填充物材料分别为聚偏氟乙烯(PVDF)和硅油,该封装材料满足水下环境电气绝缘、透声性、耐高静水压等要求[5]。由于封装管壳的厚度只有 2 mm,相对于整个器件的尺寸较小(透声帽的直径为 25 mm),因此应当将材料属性定义为壳属性;水和油是声场的传递介质,将其定义为流体属性;由于建模的尺寸大小有限,而实际水域可以视为无限大的区域,因此将水域网格的外边界定义为无反射边界,从而实现计算无限远处的声场分布。传感器封装结构的底部被固定于底座,因此将结构网格的底部定义 3 个方向约束,加上边界条件固定底面网格。在传感器外的水域里设置 1 个平面波声源,声压大小为 1 Pa,声源方向沿模型坐标系 X 轴方向,经过传感器中心点处。

本模型中涉及到的具体的材料参数如表 1、表 2 所示,表 1 为声学材料参数表,表 2 为结构材料参数。

表 1 声学材料参数表

流体材料	密度/(kg/m^3)	声速/(m/s)
水	1 000	1 500
油	700	1 330

表 2 结构材料参数

结构材料	密度/(kg/m^3)	杨氏模量/(N/m^2)	泊松比
PVDF	1 780	2.5×10^9	0.3

2.3 基于模态的声振耦合分析

在线性空间中,任意一个声压分布向量均可以由一组线性无关的声压向量线性的表示出来。线性无关的声压向量通常取特征值向量,即声学模态。声学模态是声学质量矩阵和声学刚度矩阵的特征值,即

$$(K_a-\omega^2 M_a)\{\phi\}=\{0\} \tag{1}$$

式中:K 为 $n\times n$ 的刚度矩阵,M 为 $n\times n$ 的质量矩阵,ω 为角频率,ϕ 为声学模态。式(1)能解出 N 个线性无关的特征值$\{\phi_i\}$,这样任意一个声压向量可以由 N 个特征值$\{\phi_i\}$线性地表达出来。基于模态的声振耦合分析即是根据这个原理,先求解出声学模态,再计算在外部激励作用下的响应。本模型设置的外部激励为:穿过传感器中心点、沿封装结构侧面法向的、声压为 1 Pa 的平面波声源。

首先对传感器的封装结构进行结构模态分析,结构模态是结构系统的固有振动特性,线性系统的自由振动可以被解耦合为 N 个正交的单自由度振动系统,对应系统的 N 个模态[12]。根据结构模态分析结果,可以得到封装结构的各阶模态频率和各阶模态的振型图,在模态频率附近的频段内,结构将会产生剧烈的振动,如图 4 所示为传感器封装结构的前 4 阶模态及相应的振型图,在实际的振动形态中,一阶模态起主要作用。表 3 为封装结构前五阶模态频率值,其中一阶模态频率为 4 357.09 Hz,但是该数值和器件实测的一阶谐振频率有很大差异。正如上文所述,在以往的仿真研究中常用结构自身的特征频率来衡量器件的带宽,但是在水下环境中结构和流体强烈的耦合作用将不能忽视,耦合作用会使器件的谐振频率大幅降低。因此器件的工作带宽严重依赖于声振耦合的频率。

表 3 封装结构的前五阶模态频率

模态	频率/Hz
1 阶	4 357.09
2 阶	4 358.95
3 阶	6 180.73
4 阶	6 193.58
5 阶	6 568.42

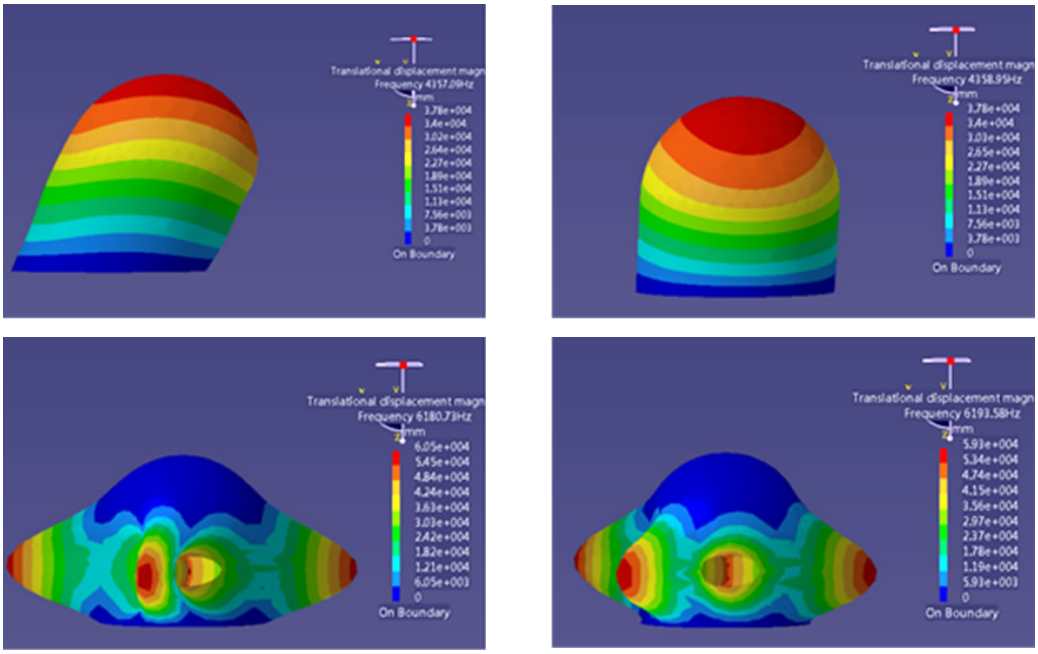


图 4　封装结构的前 4 阶模态振型位移云图(图注:形变大小经过放大处理)

针对传感器封装内的油腔进行声模态分析,可以得到封装内部的声场特征频率。声学有限元可以计算声腔振动的模态,得到封装内油腔的自然频率以及共振时的声压分布,通过分析介质的声模态,可以得到腔内油介质的自然频率和共振时的声压分布,通过仿真得到油腔的前五阶模态频率如表 4 所示。油腔的边界条件是底部固定约束,周围其他边界为封装的硬声场壁边界。

表 4　油腔的前五阶模态频率

模态	频率/Hz
1 阶	24 702.00
2 阶	30 804.03
3 阶	32 497.34
4 阶	32 519.14
5 阶	47 929.63

由上文可知,结构的一阶模态频率为 4 357.09 Hz,而水下封装结构实际的谐振频率为 1 700 Hz 左右,这是因为封装结构和水域产生了强烈的耦合作用(在真空中没有耦合),因此我们需要考察结构和水域的耦合模态。表 5 为水和结构的耦合模态前五阶频率。

表 5　水域和结构的前五阶耦合模态频率

模态	频率/Hz
1 阶	1 633.87
2 阶	1 659.61
3 阶	6 184.40
4 阶	6 241.70
5 阶	6 570.81

由表 5 可以看出,一阶耦合模态频率为 1 633.87 Hz,这一数值与后期得到的传感器封装实际的谐振频率几乎吻合。因此可以得出结论,在水下多物理场耦合环境中,器件的工作带宽取决于耦合模态频率,而不是结构本身的模态频率。

在得到封装结构的模态特性与结构和水域的耦合模态特性后,为了进一步研究传感器封装对于声源的响应和声场分布情况,进行基于模态的声振耦合计算,分析在 10 Hz~3 000 Hz 频段内,在 1 Pa 平面声源作用下水声传感器的声场分布以及传递损失。图 5 所示为声振耦合之后,分布于传感器油腔中心处场点(即传感器敏感单元所在位置)、油腔内的场点、封装管壳处场点和水域中的两个场点,共 5 个场点的声压频率响应曲线。可以看出各个场点的声压值在 1 700 Hz 左右声压急剧上升,这是因为此时封装结构和外界流体产生强烈的声振耦合作用,形变幅度剧烈的结构振动使得油腔和水中封装结构附近的区域的声压值急剧升高,因此为了保证传感器能够有一定的精度,获得真实的声源大小,必须将传感器的工作带宽频段设置远离一阶谐振点。另外,从图 5 中可以看出在 2 600 Hz 频率左右也有类似的峰值产生,该频率点可能是声振耦合的第 2 阶

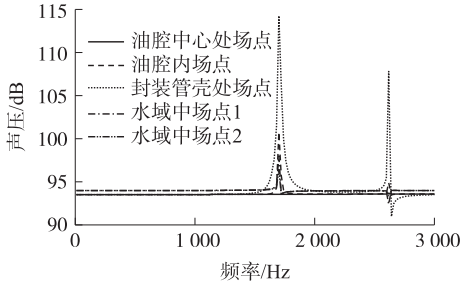
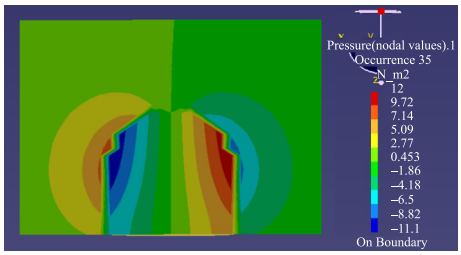


图 5　3 个场点处的声压频率响应曲线

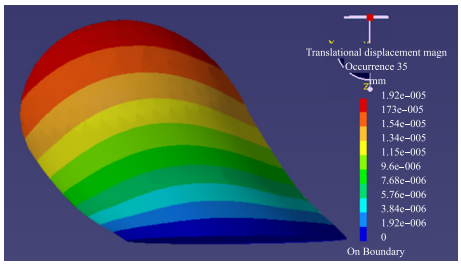
模态频率所在处,但是可能由于谐振产生的声压相位的不同,部分位置的场点声压值出现了峰谷。对比封装结构内部和外部的场点声压频响曲线与纵坐标的交点数值,可以得到声压信号透过传感器封装之后衰减了 0.5 dB 的大小。

从图 5 中还可以观察到,不同区域的声压大小空间分布规律。在水域内,离声源点越远的位置其声压值越小,这是因为声场在水域内有一定的衰减,但是当频率在谐振点附近时,由于封装结构的剧烈振动,在封装结构附近的场点声压幅值急剧上升形成波峰,并且靠封装结构越近声压曲线的峰值越大;在油域内,场点位置越靠近封装结构,在谐振时的声压频响曲线峰值越大,由于封装结构是完全对称结构,在油腔的中心处结构振动引起的声场扰动相互抵消,因此在中心处的场点声压频响曲线没有波峰出现。

图 6(a)为在谐振频率附近 1 710 Hz 时传感器封装和油腔的截面声压分布图,图 6(b)是 1 710 Hz 时封装结构的形变位移幅值图。可以从图 7 看出,在谐振频率左右时,封装结构的振动变化幅值明显增大,对结构附近的声场造成较大的干扰,因此必须将传感器的工作频段设置在一阶谐振点以下。



(a) 截面声压分布云图



(b) 封装形变位移幅值云图

图 6 1 710 Hz 时声压分布云图和位移分布云图

3 不同的封装材料对传感器关键性能的影响

为了拓宽传感器的带宽,必须使封装结构的一阶耦合模态频率大于水声传感器的工作频率上限,下面将研究不同封装材料的选取对传感器带宽的影响,以及声压传递损失的影响。由声学理论可知,自由振动谐振子的固有频率 f 可以表示为:

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}} \tag{2}$$

式中:K 为弹性系数,M 为系统的固有质量。从式(2)可以看出,要提高系统的固有频率 f,可以通过增加系统的弹性系数 K,或者减少系统的质量 M。下面将通过有限元仿真不同弹性系数材料的封装结构模型来验证这一结论,分别仿真以 PVDF 聚偏氟乙烯、FRP 玻璃钢、PU 聚氨酯为封装材料的谐振频率和声传递损失仿真。聚氨酯材料具有良好的透声性能和防水性能,常被用来作为水下传感器的封装材料[5],玻璃钢材料能够很好的承受水下的静水压,耐压性能较好,因此选用这两个材料仿真其封装性能。表格 6 为玻璃钢和聚氨酯的材料参数(聚偏氟乙烯材料参数见表 2)。

表 6 结构材料参数

结构材料	密度/(kg/m^3)	杨氏模量/(N/m^2)	泊松比
FRP	1 200	3.0×10^9	0.37
PU	1 070	6.25×10^7	0.42

在本文的第 2 节中的图 5 为使用 PVDF 材料的声压频响曲线图,并对图中的数据做出了相应的分析。图 7 为 FRP 玻璃钢材料的声压频响曲线图,图 8 为 PU 材料的声压频响曲线图。

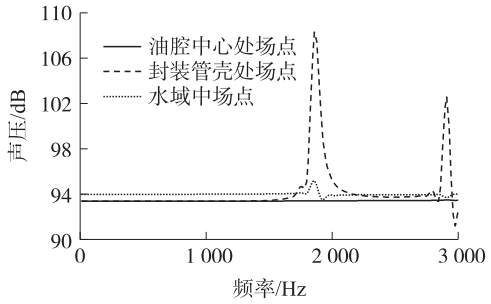


图 7 封装材料为 FRP 的声压频响曲线图

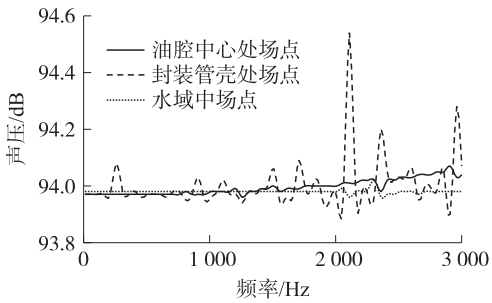


图 8 封装材料为 PU 的声压频响曲线图

从图中可以得到封装结构的谐振频率从而得知器件的工作带宽,从不同场点的纵坐标的声压值差值可以得到声波信号经过封装之后的传递损失,如表 7 所示,将不同封装材料情况下的传感器性能参数整理如下。

表 7　不同封装材料的性能参数

封装材料	PVDF	FRP	PU
带宽/Hz	1 700	1 850	270
声传递损失/dB	0.5	0.62	0.01

由表 7 可以得出结论,在结构和厚度一样的情况下,封装材料的弹性模量越大,结构的一阶谐振频率越高,传感器的带宽越大,但同时声透过封装的衰减也越大;相反的,材料的弹性模量越小,声传递损失越小,但是结构的一阶谐振频率越低,传感器的带宽越小。仿真结果也与理论声学分析的结论相符合,在封装结构尺寸相同的情况下,传感器的带宽和灵敏度两者相互制约,所以在选取传感器的封装材料时应当根据实际情况予以综合考量。

4　结论

本文对 MEMS 水声传感器封装结构对于传感器关键参数的影响进行了声振耦合仿真,并且观察到传感器在水下工作时的声场分布情况。多物理场耦合仿真主要在 10 Hz~3 000 Hz 频段内,得到了传感器的声压频率响应曲线,由频响曲线的趋势得到封装的耦合谐振频率大概为 1 700 Hz 左右;由不同场点的频响曲线分布情况得到声场在空间内的衰减趋势,声压信号透过封装结构的衰减损失约为 0.5 dB。并且指出器件的谐振频率和封装结构自身的一阶谐振频率存在较大差异,水听器的实际工作带宽严重依赖于一阶耦合模态频率。最后研究了不同封装材料对传感器关键性能的影响,得出弹性模量越大,传感器带宽越大同时灵敏度越小的规律性总结,但是如何设计能够折中带宽和灵敏度的其他封装结构,还需进一步研究。本文的仿真研究结果可以指导器件结构设计和材料参数的选择,通过完善模型和实物进一步匹配,可以合理的预估器件性能。本文的耦合仿真方法可以为传感器封装结构的声学特性提供快速准确的评估手段,并为其结构优化提供有效的数值方法支持。

参考文献:

[1] 徐伟,张国军,刘源,等. 杯型 MEMS 矢量水听器的设计[J]. 微纳电子技术,2016,53(6):374-380.

[2] Rockstad H K, Kenny T W, Kelly P J, et al. A Microfabricated Electron-Tunneling Accelerometer as a Directional Underwater Acoustic Sensor[C]//American Institute of Physics Conference Series. American Institute of Physics, 1996:57-68.

[3] Xue C, Chen S, Zhang W, et al. Design, Fabrication, and Preliminary Characterization of a Novel MEMS Bionic Vector Hydrophone[J]. Microelectronics Journal, 2007, 38(10):1021-1026.

[4] 樊姣荣,王晓瑶,刘文怡,等. MEMS 矢量水听器阵列信号处理研究[J]. 传感器与微系统,2012,31(1):14-16.

[5] 张国军. 纤毛式 MEMS 矢量水听器研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.

[6] 李振,张国军,薛晨阳,等. MEMS 仿生矢量水听器封装结构的设计与研究[J]. 传感技术学报,2013,26(1):25-30.

[7] 张国军,陈尚,薛晨阳,等. 纤毛式 MEMS 矢量水声传感器的仿生组装[J]. 纳米技术与精密工程,2009,7(3):221-227.

[8] 郭静,张国军,王续博,等. MEMS 仿生矢量水听器微结构的有限元分析[J]. 强激光与粒子束,2015,27(2):128-132.

[9] 李增刚,詹福良. Virtuallab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京:国防工业出版社,2010:166.

[10] 陈尚. 硅微 MEMS 仿生矢量水声传感器研究[D]. 太原:中北大学,2008.

[11] 许姣,张国军,石归雄,等. 纤毛式矢量水听器新型封装结构的研究[J]. 传感技术学报,2011,24(4):517-521.

[12] 徐雪祥,张鉴,鲍霖,等. 一种 MEMS 扭摆式强磁场测量传感器[J]. 电子器件,2017,40(2):301-305.

石晶晶(1994-),女,汉族,籍贯:江苏宿迁,工作单位:东南大学,学位:硕士,主要研究方向为 mems 传感器,jingjing_stone@seu.edu.cn;

黄晓东(1983-),男,汉族,籍贯:福建福州,工作单位:东南大学,学位:博士,职称:副教授,主要研究方向为微纳能源器件(能量收集与存储)与系统集成,新型微纳传感器,器件物理、材料与工艺,xdhuang@seu.edu.cn;

刘　文(1983-),男,汉族,籍贯:中国安徽,工作单位:西门子工业软件(北京)有限公司,学位:博士,主要研究方向:流体力学,结构力学,声学,气动声学,气动弹性力学等,liuwengemini@hotmail.com。