

PVDF 水听器加速度响应特性的 有限元分析 *

肖孙圣 张金铎 栾桂冬

(北京大学电子学系 北京 100871)

1996 年 3 月 7 日收稿

1996 年 6 月 10 日定稿

摘要 本文用有限元法分析了压电高聚物 PVDF 圆柱形水听器的材料参数与几何尺寸对其加速度响应的影响。针对理论分析,进行了水听器加速度响应实验,实验结果与理论分析基本相符。

PACS 数 43.88

Analysis of the acceleration response of PVDF piezoelectric polymer hydrophone using finite element method

XIAO Sunsheng ZHANG Jinduo LUAN Guidong

(Department of Electronics, Peking University Beijing 100871)

Received March 7, 1996

Revised June 10, 1996

Abstract With the finite element method, the influence of material property and geometry factor of a cylindrical PVDF piezoelectric polymer hydrophone on the acceleration response have been analyzed in the paper.

Compared with the theoretical analysis, the experiments of the hydrophone acceleration response have been performed. The experimental results is almost consistent with the theoretical calculation

前言

七十年代起,有限元法被用来解压电换能器的振动问题。国内外许多科学工作者在这方面开展了大量研究¹⁻⁷。应用有限元法可以较方便地分析各种复杂形状、多层不同材料、复杂边界条件的换能器性能,如振动模态、工作频域内的接收灵敏度和加速度特性等。以往对于换能器的研究工作主要集中在振型和导纳分析,综合前人的工作,压电有限元理论方面已基本成熟。本文着

* 中船总(八五)预研项目。

重对具体的水听器样品作有限元分析, 先计算振动模态和低频灵敏度, 在此基础上, 计算了工作频段内的加速度响应, 并且比较了在某些参数变化时, (如材料特性和几何尺寸参数) 所引起加速度响应的变化。对水听器样品的低频灵敏度和工作频段内的加速度响应进行了实验测量, 并与理论计算结果进行了对比。

1 轴对称压电有限元理论

取三角形圆环单元如图 1 所示, 选取压电方程如下:

$$\begin{bmatrix} T \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e^T \\ e & \varepsilon^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ E \end{bmatrix} \quad (1)$$

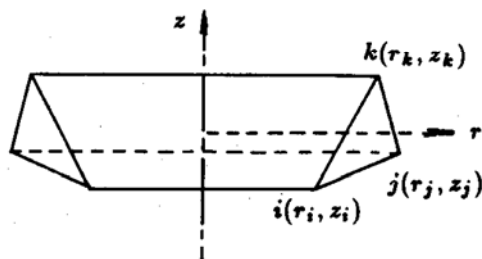


图 1 环单元模型

由有限元理论, 考虑外力 F 所作的功, 对于稳态简谐振动, 不难得到离散化方程⁷:

$$\begin{cases} (K - \omega^2 M)u = PV + F \\ P^T u + C_0 V = Q \end{cases} \quad (2)$$

式中 ω 为角频率, K 为刚度矩阵, M 为质量矩阵, P 为机电耦合矩阵, V 为节点电压, u 为节点位移, C_0 为压电体夹紧电容, Q 为电极面的自由电荷。

上面为外力或外电场作用下的结构运动方程, 下面为机电边界条件。

(1) 当电端短路, 并且外作用力 $F = 0$

则特性方程变为:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (3)$$

即可求出共振频率和相应的振动模式,

(2) 当电端开路, 电极自由电荷 $Q = 0$, 且外作用力 $F = 0$, 由 (2) 式得

$$V = -P^T u / C_0 \quad (4)$$

所以, $(K - \omega^2 M + PP^T / C_0)u = 0$

由

$$|K - \omega^2 M + PP^T / C_0| = 0 \quad (5)$$

即可求出系统的反共振频率, 对于接收换能器, 在该频率处有最大接收灵敏度, 若外部作用力不为零, 则可得到:

$$(K - \omega^2 M + PP^T / C_0)u = F$$

故

$$V = -\frac{1}{C_0} \frac{P^T}{K - \omega^2 M + PP^T / C_0} F \quad (6)$$

2 水听器的有限元模型

2.1 PVDF 水听器模型

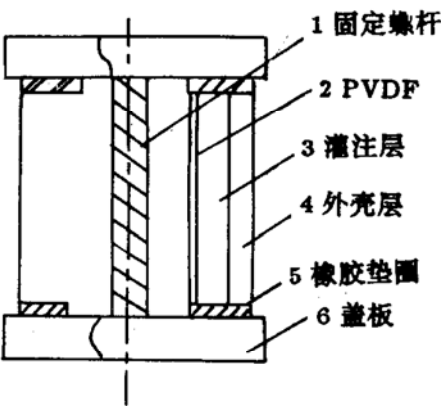


图 2 灌注式 PVDF 型水听器

取灌注成型 PVDF 水听器模型如图 2⁸, 表 1 列出了水听器材料名称与参数, PVDF 膜的压电系数取 e 、 $c^E(s^E)$, ε^S 阵参见附录.

表 1 水听器材料参数表

编号	名称	材料	密度 (10^3 kg/m^3)	杨氏模量 (10^9 N/m^2)	泊松比
1	固定螺杆	钢	7800	216	0.28
2	压电薄膜	VPDF	1800	见附录	0.40
3	灌注层	聚氨脂	1094	0.311	0.48
4	外壳	有机玻璃	1176	4.16	0.40
5	密封圈	橡胶	1430	0.1	0.49
6	盖板	聚丙烯	922	3.02	0.40

2.2 模型单元和结点参数

取轴对称环状单元对模型进行单元划分, 划分情况如表 2.

表 2 模型所分单元和结点数

模型	压电单元数	压电节点数	非压电单元数	非压电节点数
PVDF 型	15	32	126	434

2.3 谐振模态和灵敏度的计算

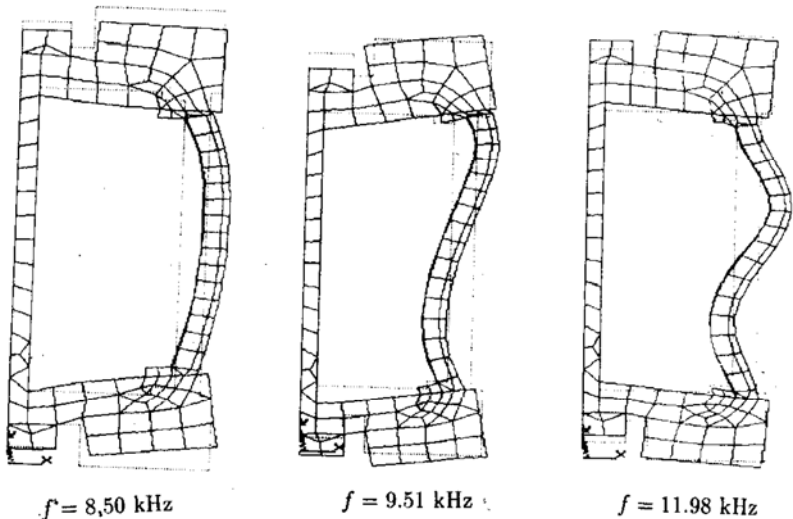


图 3 PVDF 水听器模型前三阶谐振图

对 PVDF 模型进行模态分析, 得到 PVDF 的前三阶谐振频率为 8.50 kHz , 9.51 kHz , 11.98 kHz , 模型的谐振模态图见图 3 . 可见在 100—1000 Hz 内灵敏度和加速度响应特性较平坦. 水听器接收到该频段内的声信号, 可以看成是水听器表面受到沿圆周方向均匀压力 (水听器尺寸远小于被测声信号波长), 由前面所取的轴对称环状单元, 水听器外壳层上的压力即可简化为一维线压力边条件. 加入线压力边条件, 对模型进行谐波分析, 可得到低频下的接收灵敏度为 -190 dB , 与实测值 -191 dB 一致.

3 水听器加速度灵敏度特性

PVDF 水听器的一端盖板底端加入位移边条件, 设为 δ , 则水听器该端的加速度

$$a = -\omega^2 \delta \tag{7}$$

由 (6) 第一式求得盖板底端所受力 F , 代入 (6) 第二式可得压电体电极输出电压 V_0 , 进一步可以求得水听器的加速度响应

$$M = \left| \frac{V_0}{a} \right| = \left| \frac{V_0}{\omega^2 \delta} \right|$$

这里的单位为 $V/(m/s^2)$. 若以 $1V/(m/s^2)$ 和 $1V/g$ 为参考级, 加速度响应级分别为:

$$M_L = 20 \log M = 20 \log \left| \frac{V_0}{\omega^2 \delta} \right| \quad \text{dB} \tag{8}$$

$$M_g = 20 \log \frac{V_0}{\omega^2 \delta} + 20 \log g = M_L + 19.8 \quad \text{dB} \tag{9}$$

4 材料和几何参数对水听器加速度特性的影响

盖板质量对于水听器的加速度特性有较大的影响, 为减小这种影响, 在盖板与圆管间加入橡皮垫圈, 用有限元法分析橡皮垫圈的杨氏模量和盖板质量变化时的加速度特性 (计算频率为 400 Hz) , 如图 4 , 5 所示. 水听器外壳层扬氏模量和密度变化、灌注层扬氏模量和密度变化及支撑螺杆扬氏模量变化等对水听器的加速度特性变化的影响分别如图 6—10 所示. 保持圆管的半径和两端的盖板不变, 改变水听器模型中敏感圆管的轴向长度, 以圆管轴长和圆管直径之比为横坐标, 得到水听器在 400 Hz 时的加速度响应变化如图 11 .

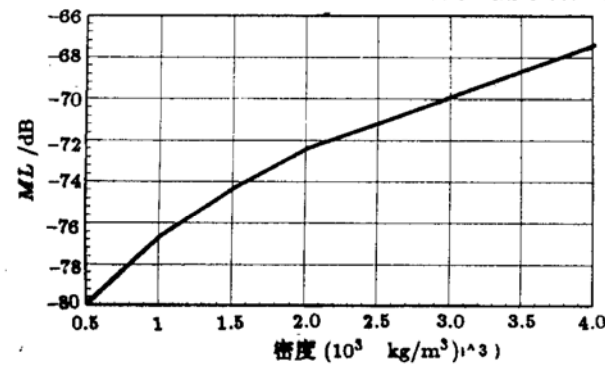


图 4 端盖板密度的影响

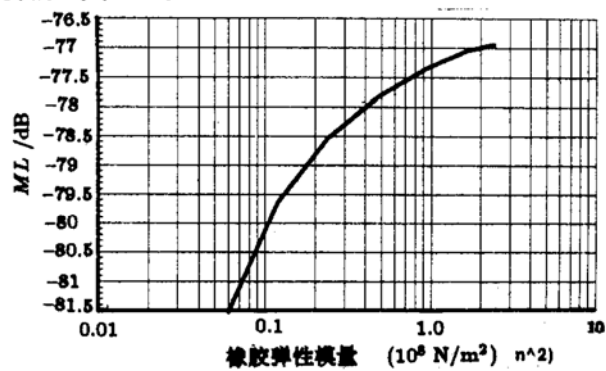


图 5 橡胶垫圈弹性模量的影响

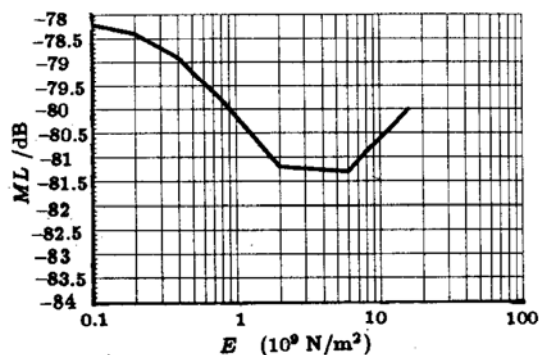


图 6 外壳层杨氏模量的影响

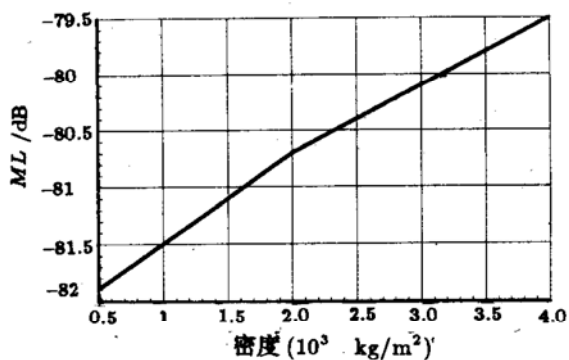


图 7 外壳层密度的影响

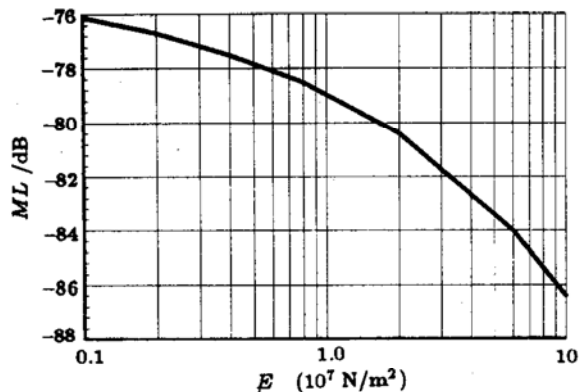


图 8 灌注层杨氏模量的影响

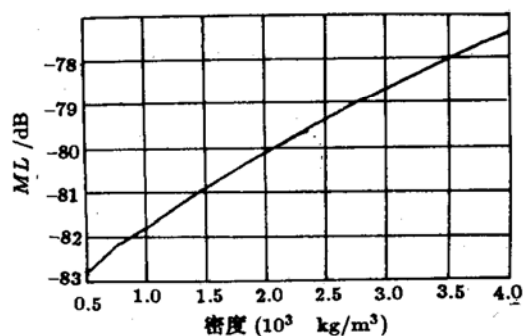


图 9 灌注层密度的影响

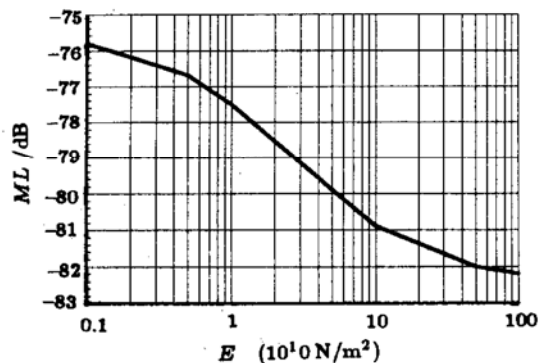


图 10 固定螺杆杨氏模量的影响

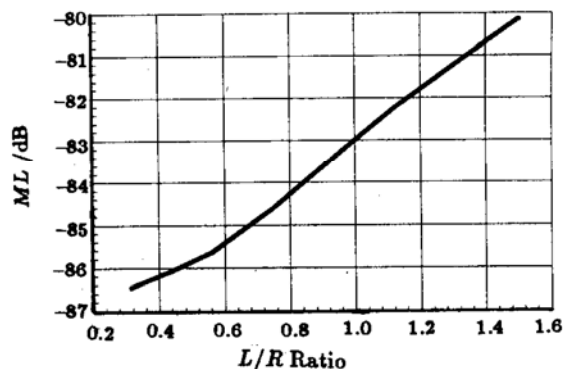


图 11 PVDF 轴向长度变化的影响

5 实验与分析

为了验证前面的计算与分析, 我们对水听器进行了实验, 测试水听器本身的加速度特性。

5.1 实验装置

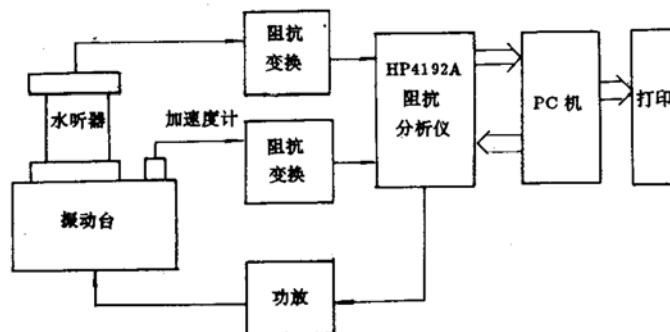


图 12 实验装置原理图

水听器和加速度传感器一同放于振动台的台面上, 两者用螺钉或强力胶固定, 由于待测特性的频率较低 (100—1 kHz), 故水听器和加速度传感器的输出都必须经过阻抗转换, 前置放大电路由电荷放大器和比例放大器构成, 使用电荷放大器的优点还在于输出特性不受线路电容和散杂电容的影响。

5.2 水听器加速度特性

在图 12 中, 测量频段与间隔由用户输入, 微机控制 HP4192A 阻抗测试仪产生激振信号, 经过功率放大后输入到激振台, 水听器和加速度计的输出信号经过前放再输入 HP4192A, 测试仪直接给出两信号幅值差的分贝数, 并传到微机中绘图或打印数据。图 13 为实测的加速度特性, 图中同时画出了理论计算曲线。加速度响应的测试与水听器本身在振台上的固定方式有很大的关系, 图 14 示出了用黄油耦合 (a) 与 502 胶粘合 (b) 的不同特性, 明显看出, 用黄油耦合的特性高于 502 胶粘合情况, 其原因可能有两个: 1、黄油耦合时其振动传递面积较大; 2、用黄油耦合相当于振源和水听器之间构成一个弹性阻尼系统, 导致传递歧变。

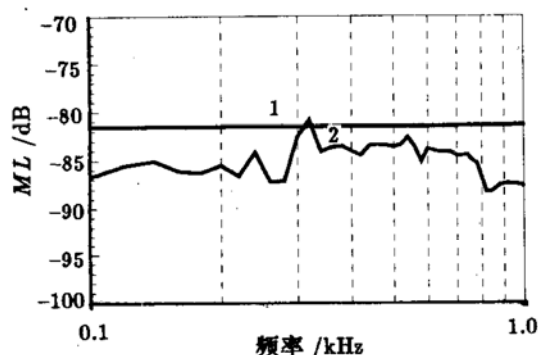


图 13 水听器加速度特性实测与理论分析结果
1- 有限元分析值 2- 实测值

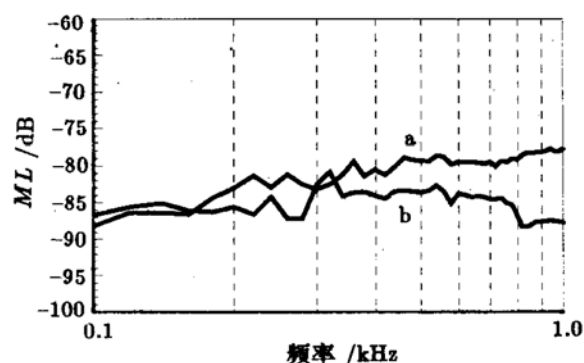


图 14 水听器固定方式比较
a-PVDF 黄油耦合 b-PVDF 用 502 胶粘合

6 小结

对于 PVDF 型水听器, 改变水听器材料参数 (杨氏模量和密度), 计算频率 $f=400$ Hz 的加速度响应, 总的趋势是各层材料的密度增加都引起加速度特性 ML 增大, 其中端盖板的影响较为显著, 密度在 $500 \sim 4000$ (kg/m^3) 范围 ML 增加 12 dB, 其次是灌注层密度和外壳层密度。灌注层密度影响较显著的原因可能是灌注层的厚度稍大于外壳层。橡胶垫圈的弹性模量在 $1.0 \times 10^8 \text{ N}/\text{m}^2$ 以下时有减振作用, 从图 5 中看出, 下降一个数量级 ML 减小 2.5 dB。图 6, 8 表明了外壳层和灌注层的弹性模量增大时 ML 下降, 其中灌注层的弹性模量变化引起的特性变化较大。由于外壳一般采用大弹性模量材料, 故计算时范围比灌注层高两个量级。外壳层杨氏模量的影响不是一个单调函数, 在 $2.0 \times 10^9 \sim 5.0 \times 10^9$ 之间有最佳值, 但总的来说它的影响并不大。

值得注意的是 PVDF 型水听器中间的预应力固定螺杆的杨氏模量对加速度响应有较大的影响, 以钢质螺杆为例, 与相同模型不加螺杆的水听器比, ML 要低 10 dB 左右, 图 10 中 E 在 ($1.0 \times 10^{10} \sim 1.0 \times 10^{11}$) 之间 ML 下降了 3.5 dB, 表明大杨氏模量的螺杆减弱了端板对于水听器的附加振动效应。

改变水听器敏感圆管部分的轴向长度加速度响应有明显的变化 (图 11), 圆管变短时, 加速度响应下降较快。

致谢 在本文工作过程中, 水听器加速度响应的测试得到中科院声学所朱厚卿研究员大力协助, 杭州应用声学研究所黄进来高工提供了水听器样品及声压灵敏度测试数据。在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Tatsuo Yamabuchi, Yukio Kagawa. Finite Element Approach for Piezoelectric Circular Rods. *The Journal of the Electrical Communication Society of Japan*, 1976, **J59-A**(10): 831
- 2 Tatsuo Yamabuchi, Yukio Kagawa. Finite Element Simulation of Two-dimensional Electromechanical Resonators. *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, 1974, **30**(7): 398
- 3 林国中, 徐贤金. 压电振子的有限元分析. 水声通讯, 1982, (3)
- 4 强盘富. 夹心式压电换能器的有限元分析法. 超声技术, 1980, (2): 9—10
- 5 鲍小琪, 徐其昌. 凹形弯线换能器的有限元分析. 声学学报, 1982, **7**(3)
- 6 刘文庆. 压电水听器有限元分析. 北京大学硕士论文, 1988
- 7 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵. 北京大学出版社, 1990
- 8 栾桂冬等. 灌注成型 PVDF 薄膜水听器. 声学学报, 1993, **18**(6)

附录 PVDF 参数 (所列参数未经坐标变换)

$$S^E = \begin{bmatrix} 2.5 & -1.07 & -1.07 & 0 & 0 & 0 \\ -1.07 & 2.87 & -1.07 & 0 & 0 & 0 \\ -1.07 & -1.07 & 2.87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.24 \end{bmatrix} \times 10^{-10} \quad (\text{m}^2/\text{N})$$

$$c^E = S^{E^{-1}} = \begin{bmatrix} 8.1 & 4.84 & 4.84 & 0 & 0 & 0 \\ 4.84 & 6.92 & 4.38 & 0 & 0 & 0 \\ 4.84 & 4.38 & 6.92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.38 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.38 \end{bmatrix} \times 10^9 \quad (\text{N}/\text{m}^2)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -3.88 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.88 & 0 & 0 \\ 1.04 & -1.64 & -6.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-2} \quad (\text{C}/\text{m}^2)$$

$$\epsilon^s = \begin{bmatrix} 9.3 & 0 & 0 \\ 0 & 9.3 & 0 \\ 0 & 0 & 9.3 \end{bmatrix} \times 10^{-11} \quad (\text{F}/\text{m})$$