

基于有限元方法的超声波仿真研究*

· 论文 ·

艾春安 韩兆林 李 剑 刘新国 蔡笑风
(第二炮兵工程大学 601 教研室 陕西 西安 710025)

【摘要】针对超声波传播的瞬态问题,提出了一种基于多物理场耦合仿真方法。分别对超声波在流体、各向同性材料、各向异性材料中传播的问题以及压电材料作为声源的问题进行了仿真,并与理论结果进行了对比,结果表明该方法能够较好的仿真超声波传播的问题;在各向异性材料中,不同传播方向的波速不同,某一传播方向纵波速度高,则该方向横波传播速度低,反之亦然;压电材料作为声源时,激励电信号频率与压电材料谐振频率相同或接近时,产生的超声波杂波较少,因此激励电信号频率的选择应该以压电材料的谐振频率为参考。

【关键词】超声波;有限元;压电;多物理场耦合

【中图分类号】 TB132

【文献标志码】 A

DOI: 10.16311/j.audioe.2015.08.09

Research of Ultrasonic Simulation Based on FEM

AI Chun'an, HAN Zhaolin, LI Jian, LIU Xinguo, CAI Xiaofeng

(601 Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

【Abstract】 Aiming at ultrasonic propagation transient problem, a simulation method based on multi-physical field coupling is proposed. The properties of transient wave propagation in fluids, isotropy materials, anisotropy materials and piezoelectric are modeled and simulated, and results of simulation are compared with the theoretical results. It is shown that ultrasonic propagation transient problem can be solved by this method; the wave speed of different direction in anisotropy materials is different, and longitudinal wave speed is high and shear wave velocity is low in a certain direction, and vice versa. Clutter is less when ultrasonic wave is produced by the piezoelectric materials and the frequency of excitation signal is the same or near the resonant frequency of piezoelectric material, so the frequency of excitation signal should be referenced by resonant frequency of piezoelectric materials.

【Key words】 ultrasonic wave; FEM; piezoelectric; multi-physical fields

1 引言

近年来,由于超声技术的迅速发展,不仅在无损检测(NDE)、结构健康检测(SHM)^[1-3]等传统的工业中获得了广泛的应用,而且在国防、医疗等方面的作用也是越来越大。研究超声波的反射、透射、散射等特性规律,对推动超声波检测技术的应用具有十分重要的意义。

采用实验方法对超声波传播的研究,难度较大,因此数值仿真方法对研究超声波传播过程就显得极为重要。该方法具有方便、准确度较高等优点,吸引了越来越多学者致力于该方面的研究。常用的数值仿真方法有边界元法(BEM)^[4-6]、有限差分法(FDM)^[7]、时域有限差分技术(FDTD)^[8]及有限元(FEM)^[6,9-10]等多种方法。其中,有限元(FEM)作为一种成熟的数值计算方法,以变分原理和剖分插

值原理为基础,将所研究的问题转化成求解单元节点的代数方程组问题,能够求解复杂的偏微分方程,并且可以很方便的与其他物理场进行耦合,具有计算精度高、应用广泛等特点,同时可以考虑多种边界条件不受其本身结构的限制。

COMSOL Multiphysics 多物理场耦合有限元软件^[11-12]是目前比较流行的大型有限元分析软件之一,能够很好的解决物理场之间的耦合问题,并具有较高的精度及强大的后处理功能,因此本文应用 COMSOL 有限元软件对不同介质中超声波传播的瞬态问题进行仿真计算。

2 超声波仿真的有限元方法

不同类型的介质中,介质的物理性质不同,超声波传播过程中的特性也不同,如液体中粘性可以忽略不计,只有纵波,而固体中由于剪切力的存在,在传播过程中同时具有横波和纵波,因此超声波在不同介质

* [基金项目] 国家自然科学基金项目(51275517)

中传播的控制方程不同,超声波传播的表征量也不同。

2.1 超声波在液体中传播的控制方程

在液体介质中,超声波传播的方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d + \frac{1}{\rho c^2} \left(\frac{(\gamma-1)k}{C_p} \right) \frac{\partial \nabla p_t}{\partial t}) \right) = Q_m \\ p_t = p + p_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_t 为总压力; c 为声速; ρ 为流体的密度; C_p 为常压热容; γ 比热率; 为导热系数 k ; p_b 为背景压力; p 为压力; Q_m 为偶极源; \mathbf{q}_d 为单极源。

在超声波全反射界面采用硬声场边界条件

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) = 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{n} 为边界方向矢量。

在材料半无限长边界处,为无反射边界,采用平面波辐射边界条件

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \right) = Q_t \quad (3)$$

2.2 超声波在固体中传播的控制方程

由牛顿第二定律,超声波在固体材料中传播的控制方程为

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}_v \quad (4)$$

式中: ρ 为材料的体密度; \mathbf{u} 为位移矢量; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; \mathbf{F}_v 为机械载荷向量。

应力与应变的关系为

$$\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_0 = \mathbf{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_0$ 为初始应力; \mathbf{C} 为弹性矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot$

$[(\nabla \mathbf{u})^T + (\nabla \mathbf{u})]$ 为应变张量; $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 为初始应变。

在超声波反射界面采用固定约束边界条件

$$\mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

在材料半无限长边界处,为无反射边界,采用低反射边界条件

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = -\mathbf{d}_i \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (7)$$

式中: \mathbf{n} 为边界方向矢量; \mathbf{d}_i 为密度 ρ 、横波速度 C_s 、纵波速度 C_p 的函数。

2.3 压电材料的控制方程

当超声波由压电材料产生,即压电材料与固体弹性介质耦合时,压电材料的控制方程由压电方程可

知,应变、应力、电位移及电场强度之间的关系为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}_E \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{e} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_s \mathbf{E} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力; \mathbf{c}_E 为压电材料的弹性矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变; \mathbf{e} 为耦合矩阵; $\mathbf{E} = -\nabla V$ 为电场强度, V 为压电材料两端电压; \mathbf{D} 为电位移; $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ 为介电常数。

压电材料与弹性材料边界处,满足应力分量和位移分离连续性条件,即

$$\begin{cases} \mathbf{n}_i \boldsymbol{\sigma}_{ij}^I = \mathbf{n}_i \boldsymbol{\sigma}_{ij}^{II} \\ \mathbf{u}_j^I = \mathbf{u}_j^{II} \end{cases} \quad (9)$$

式中: 上标“ I ”表示压电元件的变量; 上标“ II ”表示弹性介质的变量。

3 结果与讨论

3.1 超声波在水中的传播

超声波在水中传播的几何模型及结果如图1所示。在采用 COMSOL 仿真时,选用压力声学模块,仿真模型为 $4.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的矩形,仿真模型上表面中间处施加强度 1 mm 频率为 $f = 1 \text{ MHz}$ 一周期的正弦波压力载荷。模型下表面为硬声场边界,左右两端为平面波辐射边界。图1为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时刻波的传播情况,以压力 P 表征波的传播情况,由仿真结果可以发现只有纵波,与超声波理论结果相符。经计算纵波波速为 1481 m/s ,而水中声速为 1490 m/s ,基本吻合,说明该方法对超声波在流体中传播的仿真结果有较高精度。

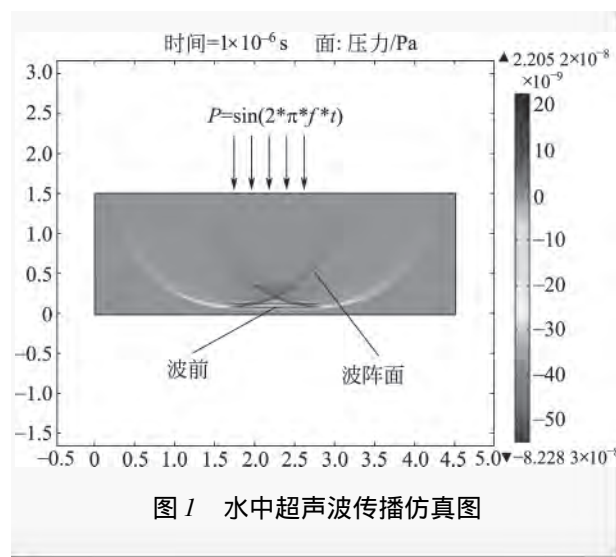


图1 水中超声波传播仿真图

3.2 超声波在铝中的传播

超声波在铝中传播的几何模型及结果如图2所

示 在采用 COMSOL 仿真时, 选用固体力学模块, 仿真模型为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的正方形, 模型材料为钢, 仿真模型上表面中间处施加长度 4.5 mm 频率为 $f = 1\text{ MHz}$ 一周期垂直向下的正弦波力载荷, 模型下表面为固定约束边界, 左右两端为低反射边界。图 2 为 $4 \times 10^{-6}\text{ s}$ 时刻波的传播情况, 以总位移 $\sqrt{u^2 + v^2}$ 表征波的传播情况, 由图可以发现同时具有纵波和横波, 与理论结果相符, 经计算纵波波速为 6198 m/s , 横波波速为 3122 m/s , 而铝的理论纵波速度为 6176 m/s , 横波波速为 3103 m/s , 计算结果与理论结果吻合度较好, 说明仿真结果可信度较高。

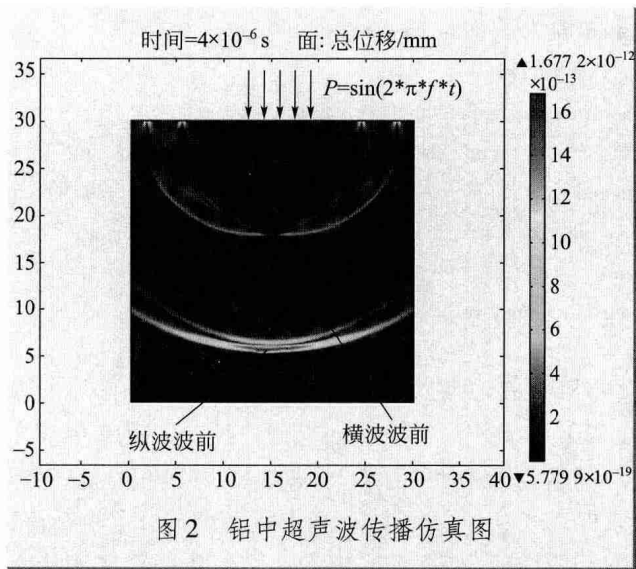


图2 铝中超声波传播仿真图

3.3 超声波在各向异性材料中的传播

超声波在各向异性材料中传播的几何模型及结果如图 3 所示, 在采用 COMSOL 仿真时, 同样选用固体力学模块, 仿真模型为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的正方形, 模型材料为复合材料, 仿真模型上表面和左边界中间处, 同时施加长度 4.5 mm 频率为 $f = 1\text{ MHz}$ 一周期垂直向下及水平向右的正弦波力载荷, 模型下表面为固定约束边界, 右边界为低反射边界。图 3 为 $2.5 \times 10^{-6}\text{ s}$ 时刻波的传播情况, 以总位移 $\sqrt{u^2 + v^2}$ 表征波的传播情况, 由仿真结果可以发现, 各向异性材料中不同传播方向的波速不同, 而且相差较大, 某一传播方向纵波速度高, 则该方向横波传播速度低, 反之亦然。

3.4 压电材料激发的超声波

如图 4 所示为压电材料激发超声波在铝中传播的几何模型及结果, 在采用 COMSOL 仿真时, 选用压电设备模块, 压电材料为 PZT-5H, 几何尺寸

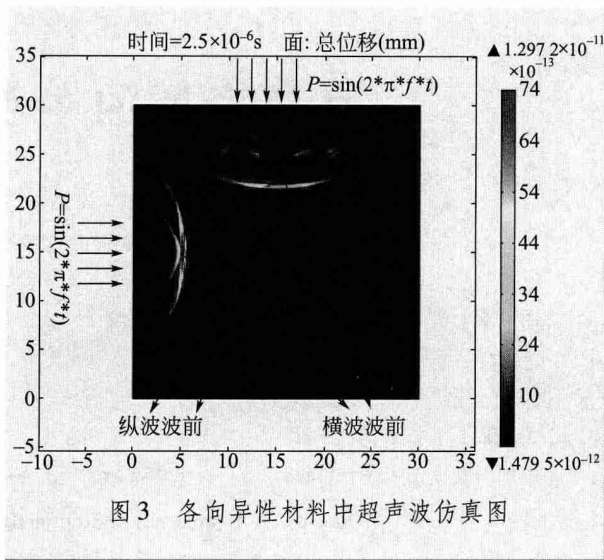


图3 各向异性材料中超声波仿真图

为 $0.500\text{ mm} \times 0.033\text{ mm}$, 将铝设置成线弹性材料, 铝的几何尺寸为 $4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的矩形, 压电材料上表面接地, 下表面施加频率为一周期频率为 $f = 100\text{ MHz}$ 正弦交流电压, 铝上表面为固定约束边界, 左右边界为低反射边界。图 4 为 $1.7 \times 10^{-7}\text{ s}$ 时刻波的传播情况, 同样以总位移 $\sqrt{u^2 + v^2}$ 表征波的传播情况, 由图中可以看到, 超声波只有纵波和横波, 纵波和横波之间的杂波较少, 可以忽略不计, 这是由于该几何尺寸的压电材料自身的谐振频率约为 100 MHz , 采用相同频率电压激励下, 压电材料处于谐振状态, 产生的超声波频率同样约为 100 MHz , 因此在进行超声波检测时, 应保证激励电压频率与换能器的谐振频率相同或接近, 可消除或减少杂波, 提高超声波对缺陷的分辨率。

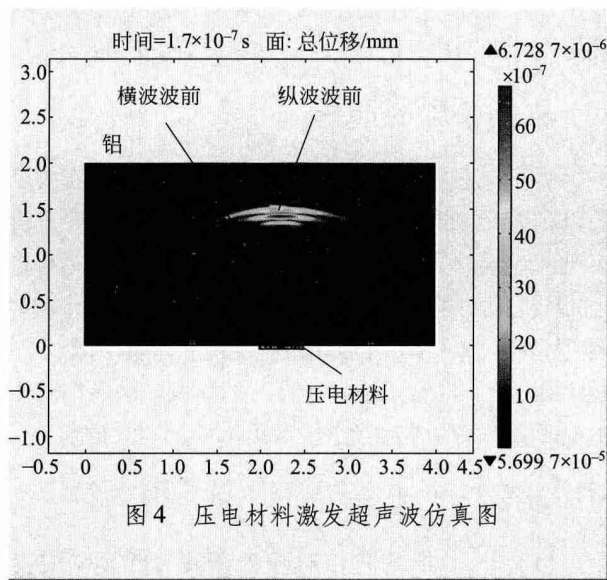


图4 压电材料激发超声波仿真图

(下转第 47 页)

声时,如果清晰可辨而不是浑在一起的话,就说明耳机的解析度很好。

(3) 被遗忘的时光

琴姐这亲切甜美的歌声从音箱里慢慢地流淌出来的时候,细细品位之时,当唱到“渐渐地”(28~29 s间)时就会听到一下“得”的细声。这大概是口型转换时的声音,也许这就是好多名家所说的“口水声”吧。用此段录音来考验器材的解析力是最好不过的,素质差一点的器材就无法重现这点微小的变化。

(4) 恰似你的温柔

该曲的前奏是一段吉他独奏,当弹到8 s时,吉他的RE MI DO三个音非常的有弹性,这最好用来检验耳机的高频特性。这一首还有妙处,就是每段结尾的“柔”字,蔡琴在两段结尾的“柔”字处理上用了不同的唱法。第一段是用常规的长音拉腔,颤音也是一般处理,渐弱收音;而最后结尾的“柔”字拉腔,她则首先不颤音,比较平直,然后在不断气的基础上加入颤音,渐强然后渐弱收尾,直接可以感觉到蔡琴的口型变化,如果器材的档次不够高的话,就不会有大变化。

(上接第41页)

4 结论

本文对超声波传播的瞬态问题进行了数值仿真研究,仿真结果与理论结果吻合较好,表明COMSOL有限元软件能够较好的仿真超声波的传播问题;在各向异性材料中,不同传播方向的波速不同,某一传播方向纵波速度高,则该方向横波传播速度低,反之亦然;压电材料作为声源时,激励电信号频率与压电材料谐振频率相同或接近时,产生的超声波杂波较少,因此激励电信号频率的选择应该以压电材料的谐振频率为参考。

参考文献

- [1] SURESH BHALLA, CHEE KIONG SOH. Electro-mechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004(10): 955-972.
- [2] HUANG Haiying, PARAMO D. Broadband electrical impedance matching for piezoelectric ultrasound transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 2011(12): 2699-2707.
- [3] 蒋锐林. 压电换能器匹配电路的设计 [J]. 电声技术, 2012, 36(9): 26-29.
- [4] 张伟志, 刚铁, 王军. 超声波检测计算机模拟和仿真的研究及应用现状 [J]. 应用声学 2003(22): 39-45.
- [5] TSUJI T, TSUCHIYA T, KAGAWA Y. Finite element and

(5) 南海姑娘

这首曲目常用来测试耳机的细节表现,通过好的耳机的表现,演唱者演唱时的换气、口水音等都会一一呈现在你的耳畔,如果耳机不好则表现不出这些来,听到的细节会很少。

8 总结

对于音乐爱好者来说,通过本文可以了解怎么用专业术语来描述音质的好坏,还可以通过试听曲目来判断不同耳机或音箱在不同频率段的表现。另外,也可以让耳机或音箱的设计者明白,对于频响曲线不同频率段所影响的音质,从而设计出客户所喜欢的产品。笔者把音质主观评价和客观评价结合起来,通过多年的设计和听音经验总结了本文,希望起到抛砖引玉的作用。

参考文献

- [1] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京大学出版社 2001.
- [2] 孟子厚. 音质主观评价的实验心理学方法 [M]. 国防工业出版社 2008.

[责任编辑] 李薇

[收稿日期] 2014-10-20

boundary element modeling for the acoustic wave transmission in mean flow medium [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002(5): 849-866.

- [6] AOUR B, RAHMANI O, ABDELAZIZ M N. A coupled FEM/BEM approach and its accuracy for solving crack problems in fracture mechanics [J]. International Journal of Solids and Structures 2007(44): 2523-2539.
- [7] 王秀明, 张海澜, 王东. 利用高阶交错网格有限差分法模拟地震波在非均匀空隙介质中的传播 [J]. 地球物理学报 2003(6): 842-849.
- [8] YUAN Xiaojuan, BORUP D, WISKIN J et al. Simulation of acoustic wave propagation in dispersive media with relaxation losses by using FDTD method with PML absorbing boundary condition [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1999(1): 14-23.
- [9] 樊振军, 张吉堂. 三维超声波声场建模仿真在无损检测中的应用 [J]. 煤矿机械 2011(7): 257-259.
- [10] 刘长福, 牛小光, 李中伟. 基于ANSYS的超声纵/横波传播仿真技术 [J]. 无损检测 2008(6): 15-26.
- [11] 郑利, 张正, 李丹, 等. 基于声表面波技术的微流体混合及仿真 [J]. 传感技术学报 2011(8): 1088-1101.
- [12] 卢旭, 陈智军, 黄鑫, 等. 基于COMSOL的声表面波标签仿真 [J]. 压电与声光 2012(4): 494-497.

[责任编辑] 李薇

[收稿日期] 2015-01-19