船用超声液位传感器的压电陶瓷瞬态特性分析

王豪,贺国,明廷锋

(海军工程大学 船舶与动力学院,湖北 武汉 430033)

摘要:为解决传统解析法难以求解压电陶瓷瞬态特性的问题,将有限元方法引入到压电陶瓷瞬态特性分析中去。介绍了压电陶瓷瞬态特性分析的有限元理论,提出了有限元计算过程中的5个关键问题的解决方法,并从给出压电陶瓷实例出发进行了仿真试验,比较了不受约束力和受环状压应力两种结构形式下压电陶瓷的发射和接收特性。研究结果证明,环状分布压应力有利于提高压电陶瓷的机电转换效率,进而提高了超声液位传感器的灵敏度,但也造成了传感器内部压电陶瓷表面应力集中和循环应力载荷的问题。 关键词:压电陶瓷;液位传感器;有限元建模;瞬态分析

中图分类号:TM282;TN384 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)11-1404-05

Analysis of transient characteristics for shipborne piezoelectric ceramic of ultrasonic liquid level transducer

WANG Hao, HE Guo, MING Ting-feng

(Academy of Ship and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: It is difficult for the traditional analytical method to analyze the transient characteristics of piezoelectric ceramic. In order to solve the problem, the finite element method (FEM) was investigated. After introducing FEM theory, the solution to the key operation process were suggested, and the model of piezoelectric ceramic used for a certain type of marine ultrasonic liquid level transducer was built using the ANSYS software. On the condition of acoustic emission and the receiving, the effect on electro-mechanical transformation efficiency and the stress field profile of two forms of compressive stress was simulated separately. The results indicate that the electro-mechanical transformation efficiency can be raised by virtue of compressive stress of ring-shaped distribution, and the sensitivity of the transducer can be raised consequently. However, it causes the appearance of stress concentration and cycle.

Key words: piezoelectric ceramic; liquid level transducer; finite element modeling; transient analysis

0 引 言

船舶的水舱、油舱、油水混合舱、发动机的进排气 系统等均需要可靠、有效的液位检测报警和自动控制 装置。超声液位传感器利用超声波在液体和气体介质 中传播速度的不同,可实现对定点液位实时、有效的监 控。某型超声液位传感器以其较高的精确度和灵敏度、 优越的适用性、较高的可靠性以及特别耐污脏水和海 水等优势,成为船舶液位监测报警系统唯一的一种液 位开关,分布于船舶各舱,确保了系统的实用效能。

作为传感器超声波信号发射、接收以及能量转换

元件的某型压电陶瓷,其瞬态特性分析是讨论在已知 电脉冲激励下或者在已知入射超声波作用下,压电陶 瓷的振动或电脉冲响应等特征^[1]。因此,压电陶瓷的瞬 态特性分析对传感器的灵敏度和可靠性有重要意义。

随着数值计算方法的发展及计算机性能的提高, 有限元方法在检测超声领域得到了广泛的应用^[2]。国 内外学者的研究主要集中在超声波在介质中传播、声 场与缺陷的作用、压电陶瓷及压电探头稳态特性等方 面^[3]。然而实际应用中压电陶瓷不论是处于声波发射 状态还是接收状态都是在瞬态条件下工作的,其振动 特性和电脉冲响应参数也都是时间的函数。因此,有

收稿日期:2011-05-19

必要对压电陶瓷的瞬态特性进行分析研究。

本研究运用有限元方法,对超声液位传感器中使 用的压电陶瓷处于声波发射和接收时的瞬态特性进 行仿真分析,讨论分析两种结构形式压应力载荷条件 下压电陶瓷振动和电脉冲响应。

1 压电陶瓷瞬态特性分析的有限元 理论

有限元方法(FEM)是一种数值计算方法,它以变 分原理和剖分插值为基础,通过有限数目的离散单元 对连续问题进行近似,实现对复杂结构和问题的分 析。目前,国际上约有90%的机械产品和装备在设计、 研制过程中采用有限元方法进行分析。ANSYS 软件是 目前比较流行的大型有限元软件,其 Multiphysics 模 块能够实现压电耦合场瞬态分析的求解。

1.1 瞬态动力学分析的有限元方程

瞬态动力学分析是用于确定承受任意时间变化 载荷结构动力学响应的一种方法。利用瞬态动力学分 析的方法,可以确定在已知瞬态载荷作用下结构体的 应力、电势、位移和应变等参量随时间的变化情况。

本研究利用 ANSYS 软件进行瞬态特性分析,在 处理结构力学线性问题所依据的有限元方程为:

$$[M]{\ddot{u}} + [C]{\dot{u}} + [K]{u} = {F(t)}$$
(1)

式中:[M]一质量矩阵,[C]一阻尼矩阵,[K]一刚度矩阵, $\{\ddot{u}\}$ 一系统加速度向量, $\{\dot{u}\}$ 一系统速度向量, $\{u\}$ 一系统 位移向量, $\{F(t)\}$ 一时间的任意载荷向量。

ANSYS 求解器的内核是面向诸多广义生成数学 模型的普适求解器,若将各参数矩阵、位移向量和载 荷向量都考虑成广义涵义,则所有物理场的线性问题 都可等效为式(1)的形式,用统一的求解器求解^[4]。

1.2 压电陶瓷瞬态特性分析的有限元方程

压电材料的压电特性涉及到电学量和力学量之间互相耦合作用,这种作用可以用下式来描述:

$$\begin{cases} T = \boldsymbol{c}^{E} \boldsymbol{S} - \boldsymbol{e} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{D} = \boldsymbol{e} \boldsymbol{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^{S} \boldsymbol{E} \end{cases}$$
(2)

式中:T—应力,D—电位移,S—应变,E—电场强度, c^{ϵ} —弹性常数矩阵,e—压电常数矩阵, ϵ^{s} —介电常数 矩阵。

压电陶瓷有限元分析所依据的能量变分原理^[5]的 数学表达式为:

$$\delta \int_{1}^{2} L dt = 0 \tag{3}$$

其中,拉格朗日函数L可用下式表示:

$$L = T_D - (U_M - W_M) + (U_E - W_E)$$
(4)

式中: T_D 一系统的动能, U_M 一弹性应变能, W_M 一外界机 械力所作的功, U_E 一电场中的电能, W_E 一外界电场所 作的功。

令 ρ 表示压电陶瓷密度, u 表示位移, ρ_v 表示体力 密度, ρ_s 表示面力密度, φ 为电位, q 表示自由体电荷 密度, σ 表示自由面电荷密度,则拉格朗日函数表达式 中诸分量由下式确定:

$$T_{D} = \frac{1}{2} \iint_{V} \rho \dot{u}^{\mathrm{T}} \dot{u} \mathrm{d}V$$

$$U_{M} = \frac{1}{2} \iint_{V} \int T^{\mathrm{T}} S \mathrm{d}V$$

$$W_{M} = \iint_{V} \int \rho_{S}^{\mathrm{T}} u \mathrm{d}V + \iint_{\Sigma} \rho_{V}^{\mathrm{T}} u \mathrm{d}S$$

$$U_{E} = \frac{1}{2} \iint_{V} \int E^{\mathrm{T}} D \mathrm{d}V$$

$$W_{E} = \iint_{V} \int \varphi q \mathrm{d}V + \iint_{\Sigma} \varphi \sigma \mathrm{d}S$$
(5)

联立式(2~5),经过剖分插值,利用变分等于零的 条件,作一系列推导得到压电耦合有限元方程:

$$\begin{cases} [\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{\ddot{u}}\} + [\boldsymbol{C}]\{\boldsymbol{\dot{u}}\} + [\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\} = V\{\boldsymbol{P}\} + \{\boldsymbol{F}'(t)\} \\ \{\boldsymbol{P}\}^{\mathrm{T}}\{\boldsymbol{u}\} + C_0 V = Q \end{cases}$$
(6)

式中:V一电极面上的电势, $\{P\}$ 一机电耦合向量, Q一电极面上自由电荷电量, C_0 一压电陶瓷的钳定电容。

本研究将式(6)扩充为广义矩阵方程,则压电耦 合问题可利用瞬态动力学分析的求解器求解^[6]:

 $\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} \end{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\boldsymbol{\ddot{u}} \} \\ \boldsymbol{\ddot{V}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} \end{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\boldsymbol{\dot{u}} \} \\ \boldsymbol{\dot{V}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{P} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \boldsymbol{P} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\boldsymbol{u}\} \\ \boldsymbol{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\boldsymbol{F}'(t)\} \\ \{\boldsymbol{Q}\} \end{bmatrix}$ (7)

2 瞬态特性分析的 5 个关键问题

建立和求解压电陶瓷瞬态特性分析模型要解决 压电陶瓷的选型及材料参数、单元选择和网格划分、 约束条件及求解方法、积分时间步长的选择及瞬态积 分参数的确定等5个问题。

2.1 压电陶瓷尺寸及材料参数

某型超声液位传感器使用的压电陶瓷,具有较高的机电耦合系数和压电应变常数、电容率、弹性常数和压电常数。在低功率情况下,共振频率和非共振频率都可用^[7]。该型压电陶瓷半径 *r*=7.725 mm,厚度 *d*=2 mm,机电耦合系数 *K*_i=0.5,其他材料特性如表 1 所示。

表1 某型压电陶瓷材料参数

密度	声速	声阻抗	弹性常数	压电常数	介电常数
$/(kg \cdot m^{-3})$	$/\!(m^{\textstyle \bullet} s^{-l})$	MRaly	$/(\times 10^{10} \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-1})$) $/(C \cdot m^{-2})$	$/(\times 10^{-9}\mathrm{C}\cdot\mathrm{m}^{-1})$
			C_{11} =12.085		
7 750	4 400	33.704	$C_{12}=7.581$	e_{11} =-5.35	<i>ε</i> 11=826
			$C_{13}=7.509$	e ₁₃ =15.784	ε ₃₃ =919
			C ₃₃ =11.087	e 15=12.295	i
			$C_{44}=2.258$		
			$C_{66}=2.105$		

2.2 单元选择与网格划分

单元类型是 ANSYS 有限元模型中唯一表征学科 类别的模型属性。随着 ANSYS 软件单元库的不断升 级、补充和拓展,使得 22X 系列单元分析多物理场直 接耦合分析技术具有更好的一致性和通用性。在 SOLID226 单元中,通过选择压电选项即可实现压电 陶瓷的压电耦合建模分析。

有限元建模的过程,也是连续体离散的过程。合理 地调整有限元网格的密度,既可使求解精度满足要求, 又能节约计算成本。对于压电陶瓷的有限元建模,单个 波长范围内要划分 20 段以上^[8]。厚度振动模式条件 下,压电陶瓷的谐振频率*f*,和反谐振频率*f*。满足下式:

$$\frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a}\right) = K_1^2 \tag{8}$$

$$f_a = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{C_{33}^D}{\rho}} \tag{9}$$

将表 1 中数据分别代入式(8,9)中,求得 f_a = 0.945 58 MHz, f_r = 0.839 12 MHz。设声速 V_a 为超声波在 压电陶瓷内的传播速度,则网格大小 ΔL 可用下式计算:

$$\Delta L = \frac{V_c}{20f_r} \tag{10}$$

将 *V*_e和 *f*_r代入式(10)中,得 Δ*L* 为 0.262 2 mm, 为 计算方便取 Δ*L*=0.2 mm 作为单元长度。

2.3 约束条件与求解方法

准确地从具体问题中抽象出反映问题本质的约 束条件,是建立有限元模型的前提条件。压电陶瓷具有



双向机电耦合特性,不同使用条件下也存在形式各异的力约束条件。压电陶瓷受约束力形式如图 1 所示,在 某型超声液位传感器的发射和接收探头中,通过压片 把大小为 $P_0 D_2^2 / (D_2^2 - D_1^2)$ 的压应力 N_0 传递到压电陶瓷 表面 $D_1 \sim D_2$ 的环形区域。为研究环状分布压应力载荷 对瞬态特性的影响,本研究以不加压应力载荷的压电 陶瓷作为参照对象,进行分析比较。

求解瞬态特性主要有3种方法:完全法、缩减法 和模态叠加法。在3种方法中,完全法功能最强大,允 许施加各类非线性特征(塑性、大变形和大应变等)。 而模态叠加法不允许施加强制位移,缩减法又不能施 加单元载荷(压力、温度等),因此在计算条件允许情 况下,采用完全法计算分析的效果最好^[9]。

2.4 积分时间步长的选择

瞬态分析求解的精度取决于积分时间步长的大 小。步长越小,精度越高,但会占用大量计算机资源。 选择最优时间步长可遵循如下原则:

(1) 求解响应频率时,时间步长必须足够小。采用 Newmark 时间积分方案,时间步长 *ITS* 取为 1 / 20 *f*, 时,可求得比较精确的解。

(2) 求解载荷与时间关系时,时间步长应小到足以"跟随"载荷函数。响应总是滞后于所加的载荷,对于阶跃载荷尤其明显,因此在阶跃时间点附近,时间步长 *ITS* 应更小,可取为 1/180 f_r。

2.5 瞬态积分参数的确定

本研究采用 Newmark 时间积分方案,主要积分参数有:2阶瞬态积分参数(GAMMA、ALPHA、DELTA)、1阶瞬态积分参数(THETA)、1阶扰动极限准则(OSLM)和光滑选项(AVSMOOTH)等^[10]。进行瞬态压电特性分析时,取ALPHA=0.25, DELTA=0.5, THETA=0.5, 其他参数采用 ANSYS 软件设定的默认值。

3 压电陶瓷瞬态特性仿真试验

对于处于发射状态的压电陶瓷,本研究主要探讨 在已知电压脉冲条件下,压电陶瓷的声辐射强度。厚 度方向振动的压电陶瓷圆片如图2所示,沿厚度方向 振动的压电振子可近似的看作是活塞式声源。根据惠



图 2 厚度方向振动的压电陶瓷圆片

更斯积分方法^[11]可知辐射声压 *P*_a 与压电振子的振动 速度幅值 *u*_a 成正比,即 *P*_a ∝ *u*_a。此时压电陶瓷声辐射 强度,可以转化为用压电振子的振动速度幅值来分 析。电压脉冲响应特性是处于接收状态压电陶瓷的重 要特性,也可反映出能量转换效率。但不论是发射还 是接收压电陶瓷特性研究,均是围绕如何提高压电陶 瓷机电转换效率展开。

3.1 瞬态发射特性仿真

激励源采用周期为 1 ms,占空比为 50%的方波脉冲,其高电平和低电平分别为 27 V 和 0 V,本研究取两个周期信号作为输入量,应用 ANSYS 软件计算压电陶瓷表面的应力场分布和振动速度幅值。



压电陶瓷表面应力分布如图 3 所示。分析比较图 3(a)、(b)可以发现:压电陶瓷负极表面,各点的受力 状态大致均匀,但是压应力存在的情况下,压电陶瓷 正极表面出现了应力集中现象。图 3(c)表明:b 点存 在较强的类似高频交变应力的循环载荷。长期工作 后,有应力集中的压电陶瓷在循环载荷作用下表面可 能会出现疲劳破损和退极化现象。超声液位传感器内 压电陶瓷失效的两个实物如图 4 所示。





压电振子振动速度幅值如图 5 所示,从图 5 可 知:在环状分布压应力作用下,压电振子振动速度有 明显的提高。由此可见,合适的压应力可以提高压电 陶瓷的机电转换效率。

3.2 瞬态接收特性仿真

本研究采用 10 个周期的正弦声压作为输入,设其 频率和幅值分别为 1 MHz 和 1 kPa,经过有限元仿真计 算得到压电陶瓷的接收电压脉冲响应如图 6 所示。



压电陶瓷电压脉冲响应如图 6 所示,从图 6 可 见:环状分布压应力作用下压电陶瓷接收电压脉冲响 应强度,明显大于没有施加压应力压电陶瓷的电压脉 冲响应。

4 结束语

超声液位传感器中压电陶瓷作为机电转换元件, 很难从传统的解析法入手对其瞬态特性进行准确的 求解分析。有限元方法为分析压电陶瓷瞬态特性分析 提供了一条有效途径。环状分布的压应力可以提高超 声液位传感器的灵敏度。对于处于发射状态的压电陶 瓷,环状分布压应力,能够提高其声辐射强度;同样, 对于处于接收状态的压电陶瓷,也可以提高接收电压 脉冲强度。环状分布的压应力,可导致压电陶瓷表面 出现应力集中和循环载荷。长期工作后,可能会导致 压电陶瓷表面疲劳破损和退极化而失效,影响超声液 位传感器的工作寿命。因此,设计超声液位传感器时, 应考虑多场耦合作用下压电陶瓷场致疲劳问题,设计 合理的压应力和加载形式,统筹兼顾传感器的灵敏度 和可靠性,避免因压电陶瓷损坏导致传感器失效。

参考文献(References):

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [2] 李明轩. 超声检测用压电换能器瞬态特性可控可调[J].应用声学,2008,27(5):338 -344.

- [3] HILL R, FORSYTH S A. Finite element modeling of ultrasound, with reference to transducers and AE waves [J]. Ultrasonics, 2004(42):253-258.
- [4] EVERSTINE G C. Finite element formulations of structucal acoustics problems [J]. Computers & Structural, 1997,65(3):307-321.
- [5] 曾 攀. 有限元分析及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [6] 莫西平. 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):1279-1290.
- [7] 冯 诺. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,2006.
- [8] RICON Y G, FREIJO F M E. Piezoelectric modeling using a time domain finite element program [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007(27):4153-4157.
- [9] 张朝晖. ANSYS11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [10] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [11] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 2版. 南京:南京 大学出版社,2006.

[编辑:李 辉]

(上接第1403页)

参考文献(References):

- [1] 宋金莲,赵 慧,林 珊. 太阳能发电原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [2] 孙中记,郭吉丰. 基于锁相环电路的超声波电机频率跟踪 系统[J]. 机电工程,2008,25(5):57-61.
- [3] 刘文彦. 时钟恢复在电力电子系统集成中的应用[J]. 机 电工程,2006,23(16):1-4.
- [4] CIOBOTARU M, AQELIDIS V, TEODORESCU R. Accurate and less-disturbing active anti-islanding method based on PLL for grid-connected PV inverters [C]//PESC2008. Rhodes, Greece: [s.n.], 2008:4569-4576.
- [5] 孙 健,潘俊民,赵 小.基于数字锁相环的并网逆变器 电流跟踪控制[J].电能质量,2010(7):41-45.
- [6] HIEU N T, LEE T W, PARK H H. All-digital phaselocked loop for optical interconnect applications [C]// I-CACT2007. Gangwon-Do, Korea: [s.n.], 2007: 1829–1832.
- [7] 张承慧,叶 颖,陈阿莲,等. 基于输出电流控制的光伏并

网逆变电源[J]. 电工技术学报,2007,22(8):41-45.

- [8] 龚锦霞,解 大,张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能 [J]. 电工技术学报,2009,24(10):94-99.
- [9] 曹凤香,罗 昉,康 勇. 基于单片机的 UPS 数字化锁相 技术[J]. 电力电子技术,2007,41(6):86-88.
- [10] RUBENS M, FILHO S, SEIXAS P F, et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications
 [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2922–2923.
- [11] 李学初,高清运. 锁相环仿真算法的研究[J]. 南开大学学报:自然科学版,2008,41(1):23-26.
- [12] IWANSKI G,KOCZARA W. PLL grid synchronization of the standalone DFIG based wind turbine or rotary UPS [C]//EUROCON2007. Warsaw, Poland, 2007:2550-2555.
- [13] 徐志英,许爱国,谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器 双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报,2009, 29(27):36-41.

[编辑:李 辉]