

# 基于 ANSYS 的温度对埋入混凝土中 压电陶瓷激励声能的影响

刘建武, 陈雨, 覃荣捷, 姜敏, 李鹏, 谭道良  
(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 基于 ANSYS 研究因温度变化对埋入混凝土中压电陶瓷的电声换能特性的影响。在压电陶瓷振动模式的基础上, 进一步通过热—结构—压电的顺序耦合分析方法讨论了在不同温度下压电陶瓷谐振频率和中心声压的变化。仿真结果表明压电陶瓷的谐振频率随温度变化表现出非线性的温度特性, 在 20 ℃ 左右和居里温度附近出现频率漂移变化的两个拐点。在温度对压电陶瓷的辐射声波场的影响仿真中, 中心点的声压值随温度变化也呈现非线性的特点, 在 20 ℃ 附近出现曲线的拐点。压电陶瓷声能的非线性特性与运用铁电体压电陶瓷晶体结构理论得到的分析一致。

**关键词:** 混凝土; 压电陶瓷; 超声检测; 压电; 温度; 谐振频率; 耦合场分析

**中图分类号:** TN712.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.01.003

## 0 引言

现代建筑工程的安全日益受到广泛关注, 对建筑工程的结构安全进行监测评估, 及时发现结构的损伤程度, 对可能发生的灾害进行提前预警并对建筑结构的安全进行常态检测评估已成为保证建筑工程安全的必然要求<sup>[1]</sup>。对混凝土结构的安全健康检测常用的检测方法包括两种即有损检测和无损检测, 有损检测通常要对建筑结构造成一定程度的损伤, 所以其应用的范围有很大的局限性, 在实际工程中一般都采用无损检测的方法。常用的无损检测是定期对混凝土建筑结构进行抽样检测, 没法实现对结构安全性能的实时监测, 更不能在灾害发生前做出及时地预警。利用压电陶瓷材料的压电特性, 将电信号转换为声波信号经混凝土传播, 分析其通过建筑结构后的声波, 可以得到建筑结构损伤的有效信息。李宏南<sup>[2]</sup>提出将压电陶瓷埋入混凝土块中形成埋入式混凝土机敏模块来实现监测建筑结构损伤信息的方法, 这种方法弥补有损检测会对结构造成一定损伤的不足, 也降低实时监测的成本。张富学<sup>[3]</sup>研究不同频率脉冲信号激励下, 接收端收到的超声波信号在 79 kHz 频率激励信号下接收到的信号能量最大。并且超声波在混凝土传播中会出现扩散损失及能量衰减, 所以接收端收到的超声波能量比

较微弱, 从而使超声波后期分析处理有很多不利影响。Wen 等<sup>[4]</sup>在研究不同厚度振动模式下压电陶瓷的声能特性, 在 79 kHz 激励频率时接收端接收到的超声波信号的能量较大, 适合于混凝土的无损检测。对不同厚度的压电陶瓷, 仿真发现存在多阶谐振频率, 在不同谐振频率下的最大振幅也不相同, 而且压电陶瓷振动辐射产生的声波信号能量与其振动幅度是相关的。现代建筑结构多为混凝土结构, 而且是长时间暴露在空气中或者在其他较恶劣环境条件下, 其最主要是温度的差异比较大, 环境温度的较大差异会让 PZT 压电陶瓷本身性能参数产生变化, 也使 PZT 压电陶瓷压电特性受到较大影响。

基于 ANSYS 耦合场分析了温度的变化使压电陶瓷激励声能如何发生变化, 压电陶瓷的谐振频率和振动超声波声压是分析压电陶瓷在混凝土中的声场分布有重要参数, 讨论在不同环境温度下压电陶瓷固有的各阶的谐振频率以及该谐振频率随环境温度如何漂移的变化规律, 并分析压电陶瓷振动所产生的声波的声压值与温度之间的变化关系。

## 1 压电埋入式混凝土超声无损检测实验系统

压电陶瓷是一种结构简单但可靠性高并应用广泛的电声工程材料, PZT-5H 为铌镁锆钛酸铅三元系压电陶瓷<sup>[5]</sup>其特点是具有较高的压电常数、弹性系数和介

电常数,是一种电容量大、压电性能优的电声材料。将压电陶瓷埋入待浇筑的混凝土,制作成机敏模块,埋入式混凝土机敏模块设计为一种可以用于无损检测的试验模型,其检测系统示意图与实物图如图 1 所示。将 PZT-5H 型压电陶瓷圆片的两个电极层和同轴电缆一端焊接,在混凝土凝固好之前就将焊接好的 PZT 压电陶瓷圆片埋入尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土块的中央位置,并将同轴电缆另一端引出。由于混凝土内部干缩应力等因素的影响,所以实际实验中会在压电陶瓷圆片外面包裹硅橡胶涂层,达到保护压电陶瓷圆片的目的<sup>[5-6]</sup>。而且,这个橡胶层还能起到了声阻抗匹配和绝缘的作用<sup>[7]</sup>,一般是采用橡胶涂层单组分室温的硫化硅橡胶 TDL-704。

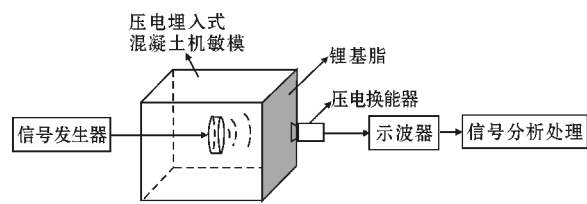


图 1 压电埋入式混凝土模块示意图及实物图

图 1 所示的埋入式混凝土超声无损检测系统是利用压电陶瓷特有的逆压电效应,通过不同频率下脉冲信号激励埋入混凝土之中的压电陶瓷,可以从压电换能器收到混凝土中压电陶瓷振动辐射产生的超声波信号,经过声-电转化传入示波器中观察经过混凝土传播路径并携带结构内部信息的声波。压电换能器在涂有锂基脂另一侧接收声波信号,转化成为电信号后导入示波器进行波形观察,也可将传递出的信息通过计算机进行后期信号降噪、频谱分析等,对携带的混凝土结构信息的信号进行进一步分析,以得到有关混凝土裂纹、孔洞等损伤缺陷信息。

## 2 温度对 PZT 压电陶瓷的谐振频率的影响分析

压电陶瓷模态是压电陶瓷的固有特性,在理想状态下,压电陶瓷结构的模态可以由下式进行求解: $([K]-\omega^2[M])\{X\}=\{0\}$ ,其中  $K$  为结构的刚度矩阵; $M$  为结构的质量矩阵; $X$  为模态矩阵。文中假定结构质量  $M$  不随环境温度变化而变化,温度升高或降低引起建筑结构的模态振型以及对应的模态频率的改变主要来自结构刚度矩阵  $K$  的变化,这主要体现在两个方面:一是温度改变了压电陶瓷材料的弹性常数,可以得到改变后的刚度矩阵  $K_T$ 。二是混凝土结构温度

的变化并不均匀,从而引起热形变不能结构内自由进行而在结构内部产生热应力,热应力会使混凝土结构的局部刚度或增加或减小,从而出现温度应力交叉影响的现象,如果把初应力时刚度矩阵记为  $K_0$ 。文献[6]已说明压电陶瓷的特征频率表现出对应力响应的不敏感性特性,可以用数据拟合的方式用  $K_0$  对结构刚度矩阵做出修正。因此,温度变化引起的结构刚度矩阵可描述为: $K=K_T+K_0$ 。

分析压电陶瓷在电信号激励下振动产生的声场在混凝土中的分布情况,其中要考虑电场、结构场以及温度场的相互影响和交叉作用。利用 ANSYS 有限元法进行多耦合场分析,多耦合场分析有直接耦合方式和顺序耦合方式两种。顺序耦合分析就是按照次序进行多次的物理场分析,通过把前一次物理场分析的结果作为后面物理场分析的载荷来完成多耦合场分析的。在考虑使用何种耦合场分析是要考虑 ANSYS 提供的耦合场单元类型能否满足实际要求。本文通过研究温度-结构-压电的顺序耦合的方法来仿真温度对压电陶瓷谐振频率的影响。

下面的仿真选用超声无损检测实验系统中使用的 PZT-5H 型压电陶瓷圆片,因为压电陶瓷的振动状态是多物理场的耦合分析,在仿真建模时选用 SOLID5 耦合场单元类型较为合宜,因为 SOLID5 耦合场单元的特点是有 8 个节点,每个节点有 6 个自由度,适用于温度、电、压电以及结构场之间的耦合分析。根据文献[7-8]设置 ANSYS 耦合场分析时涉及的压电陶瓷参数:弹性常数矩阵、介电常数矩阵和压电应力常数矩阵。在 20 kHz 到 100 kHz 频率范围内对 PZT-5H 型压电陶瓷进行模态分析,可以确定此型压电陶瓷在频率范围内的各阶振动模态,从压电陶瓷的模态分析<sup>[9]</sup>中可以发现从 20 kHz 到 100 kHz 频段范围内共有 14 个不同的振动模态,从不同振动模态下的振幅、谐振频率仿真数据可以在坐标系中得到各种振动模态下振幅和频率之间的关系,如图 2 所示的振幅和频率关系折线图。图中所示压电陶瓷中心点的振幅在整个频率范围内共出现了 4 个极大值,对应的 4 个谐振频率点分别为:40.307 kHz、60.928 kHz、79.665 kHz、84.895 kHz,可以看出 4 个振幅极大值对应的振幅随着频率增大而增大,图 3 所示在 79.665 kHz 谐振频率点时其振动形态最佳,压电陶瓷中心纵向振动明显,并且振幅极大值在横向平面分布集中,压电陶瓷的达到能量最强的振动状态。

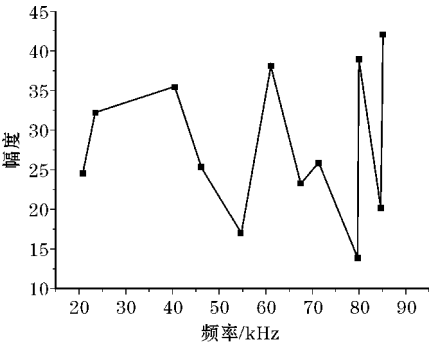


图 2 PZT-5H 振幅-频率折线图

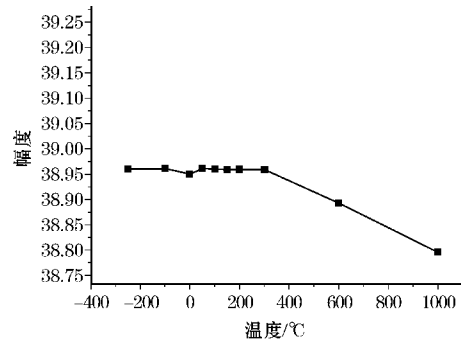


图 6 压电陶瓷振动中心点最大振幅曲线图

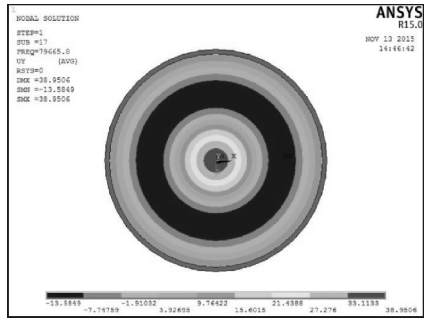


图 3 谐振频率 79.665 kHz 时振动状态

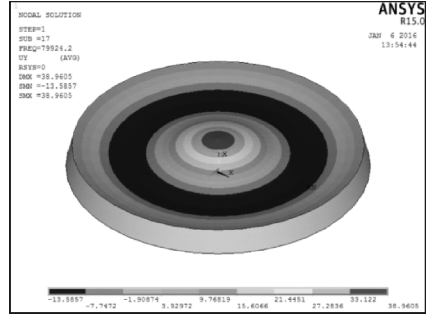


图 7 谐振频率下振动形态图

在保持压电陶瓷最佳振动状态下,温度的变化会使最优谐振频率点发生变化,下面研究在 $-250\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内不同的温度下压电陶瓷谐振频率产生的变化,其他各阶谐振频率也表现出类似的变化。结果如图 4~图 7 所示。

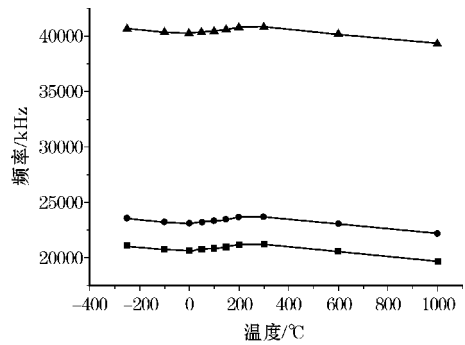


图 4 一阶,二阶,三阶温度固有频率曲线图

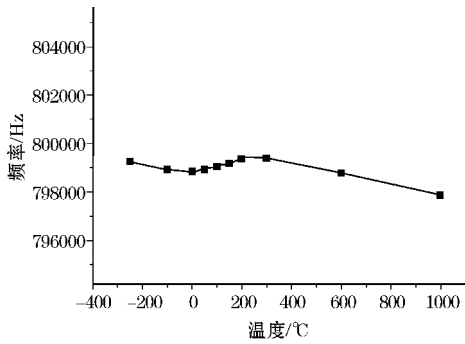


图 5 谐振频率-温度曲线图

如图 4 仿真结果可知 PZT-5H 的各阶谐振频率都表现出相似的非线性的温度特性。图 5 所示谐振频率随温度变化表现出如下特点:在低于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度段,压电陶瓷的谐振频率随温度变高而向较低频漂移。而且当温度靠近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,频率变化的速率越来越缓慢,而在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近其谐振频率几乎不再随温度变化而变化,当温度进一步升高时,谐振频率转而向较高频率方向漂移,而且温度越高,漂移的速度变快。在居里温度附近达到最大值,随后随着温度的升高明显下降。如图 6 所示温度与压电陶瓷中心点的应变幅度关系图可以看出温度变化时幅度变化相对不明显,其谐振频率下的振动形态表现一致,形态如图 7 所示中心纵振动明显,振幅极大值在中心区域分布集中的形态特点。

### 3 温度对压电陶瓷的声场影响分析

混凝土中的压电陶瓷通过振动向外辐射声波,在混凝土中的声波的最大声压和传播的指向性,不仅与受激励频率及声场的指向性有关,环境温度的变化会引起压电陶瓷特性的变化进而影响声场的分布效果。根据文献[7-8]可知压电陶瓷 PZT-5H 的导热系数 $c=1.5\text{ W/Mk}$ ;比热容 $q=420\text{ J/(kg}\cdot\text{J)}$ 在不同温度下对压电陶瓷进行辐射场仿真分析。以在模态分析中得到的最优谐振频率激励下,可以得到在不同温度下中心点振动辐射超声波的最大声压值,如表 1 所示。



表 1 不同温度下中心点最大声压值

温度/℃	声压/Pa	温度/℃	声压/Pa
-30	10005	30	10146
-20	10073	40	101275
-10	10112	50	10100
0	10134	60	10064
10	10148	70	10021
20	10153	80	9976

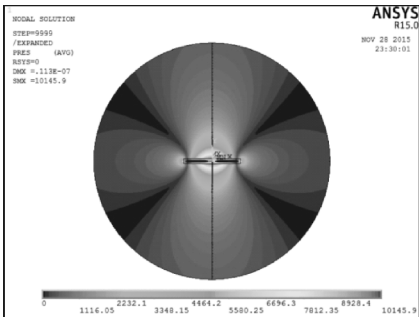


图 8 压电陶瓷声压云图

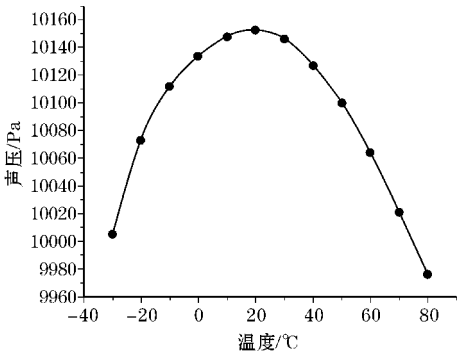


图 9 中心点最大声压-温度曲线图

在79.665 kHz激励下声压云图如图 8 所示,声场分布集中,辐射能量大,声能指向性集中。压电陶瓷辐射超声波中心点的最大声压值随温度的变化如图 9 所示呈现非线性变化,并且在20℃左右最大的声压值出现的转折。在-30℃~20℃的温度段,随着温度的升高,中心点的声压值逐渐升高且升高速率变低,在20℃附近声压值达到最大后,随着温度的升高,压电陶瓷中心点的辐射超声波最大声压值开始降低,并且降低的速率逐渐增大。

通过仿真分析中可得知 PZT-5H 型压电陶瓷的温度特性:压电陶瓷谐振频率和声场的中心点声压都表现出因温度变化而呈现非线性变化。对于 PZT 压电陶瓷,当其温度在高于居里温度变化时,此时压电陶瓷为顺电场,压电陶瓷本身无自发极化,在低于此温度时,压电陶瓷发生顺电-铁电的相变,压电陶瓷进入有自发极化的铁电相,当温度低到某一低温点时,压电陶瓷将发生铁相-铁相的相变,压电陶瓷进入另一类铁

相。在压电陶瓷谐振频率和最大声压值得温度变化过程中都出现了拐点,主要是因温度变化使压电陶瓷内部发生的相变造成的,在居里温度点以下,这些相变主要是铁电-铁电相变,而这种相变并非瞬间完成,因此非线性特征点出现的时间也有一定差异,在居里温度点则出现顺电-铁电的相变,对压电陶瓷的性能影响也较大。

4 结束语

在分析压电陶瓷振动模态的基础上,利用温度-结构-压电多物理场耦合分析了压电陶瓷的各阶谐振频率与温度之间存在的非线性关系,压电陶瓷的压电性能在一定的温度范围内保持基本稳定,当温度高于居里温度临界点时,这时谐振频率随温度产生明显的漂移,其压电特性收到很大影响,因此 PZT-5H 型压电陶瓷工作温度不能高于其居里温度。通过温度变化对埋入式混凝土压电陶瓷的声场仿真表明:压电陶瓷中心点的最大声压值与温度之间亦是是非线性的关系,在20℃以下随温度升高而增大,在20℃以上随温度的升高而减小。在用压电陶瓷做实验或工程使用之前,通过 ANSYS 仿真分析,可以大致确定压电陶瓷压电性能保持稳定的温度范围,避免由于过高或过低的温度对压电陶瓷造成的损伤,为后期的无损超声检测系统打下基础,是一种实用可行的方法。

参考文献:

[1] Glenn Washer. Paul Fuchs of Ultrasonic Testing of Reactive Powder Concrete [J]. IEEE Transaction on Ultrasonic Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004, 51 (2) : 193-194.

[2] 李宏南. 结构健康监测 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 8-15.

[3] 张福学. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[4] Wen Y, Li P, Huang S. Study on the Readout of Piezoelectric Distributed Sensing Network Embedded in Concrete [J]. SPIE, 1998, (3) : 64 - 67.

[5] 郭浩, 李平, 文玉梅, 等. 埋入压电材料的机敏混凝土研究 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (1) : 202-206.

[6] Wen Y, Chen Y, Li P. Characterization of PZT Ceramic Transducer Embedded in Concrete [J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2006, 128 (1) : 116-124.

[7] Yu Chen, Yumei Wen, Ping Li. Characterization of Dissipation Factor sin Terms of Piezoelectric E-

- quivalent Circuit Parameters [J]. IEEE transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, 2006, 53(4): 2367–2369.
- [8] 陈雨, 文玉梅, 李平. 压电陶瓷应力作用下的损失特性[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊): 151–153.
- [9] 安占营. 基于压电埋入式模块的混凝土声检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [10] Piotr Chrzastowski-Wachtel, Boualem Benatalah, Rachid Hamadi, et al. A Top-Down Petri Net-Based Approach for Dynamic Workflow Modeling[M]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2678: 336–353.
- [11] 田卉, 文玉梅, 李平, 等. 埋入混凝土结构中的 PZT 压电陶瓷温度特性研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9): 1978–1980.
- [12] 陈雨, 文玉梅, 李平. 埋入混凝土中压电陶瓷应力及温度特性研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(4): 658–661.
- [13] 李达, 黄兰喜, 徐曼琪. RC 串联电路暂态过程时间常数的分析[J]. 重庆文理学院学报, 自然科学版, 2009, 28(3): 24–26.
- [14] 谭斌, 陈雨, 黄润, 等. 背衬对埋入混凝土中压电陶瓷激励声能的影响[J]. 传感技术学报. 2011, 24(12): 1691–1695.
- [15] 李鹏程, 陈雨, 谭斌, 等. 背衬对埋入混凝土中压电陶瓷电-声特性的影响[J]. 传感技术学报. 2012, 25(1): 44–48.

## Research on the Influence of Temperature of the Piezoelectric Ceramic Embedded in Concrete to the Energy of Acoustic Signal

LIU Jian-wu, CHEN Yu, QIN Rong-Jie, JIANG Min, LI Peng, TAN Dao-liang

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A research based on vibration mode piezoelectric ceramics on the basis of further by heat-structure-piezoelectric coupling analysis method discussed changes at different temperatures in the resonance frequency of the piezoelectric ceramics. The simulation results show that the resonant frequency of the piezoelectric ceramics exhibits nonlinear temperature characteristics with temperature change, the temperature around 20 °C and the Curie temperature are the two inflection points of the frequency drift. The influence of temperature on the acoustic field of the piezoelectric ceramic is simulated. The central point of the sound pressure value is also nonlinear with the temperature, and it is the turning point of the curve near 20 °C. The non-linear characteristics of acoustic energy of piezoelectric ceramics are consistent with those obtained by the theory of crystal structure of ferroelectric piezoelectric ceramics.

**Keywords:** concrete; piezoelectric; ultrasonic testing; piezoelectricity; temperature; resonant frequency; coupled field analysis