

基于 ANSYS 的压电陶瓷晶片 PZT 仿真分析

范兴明, 马世伟, 张 鑫, 李 震

(桂林电子科技大学 电气工程及其自动化系, 广西 桂林 541004)

摘 要: 电力支柱瓷绝缘子超声波检测对预防和检测绝缘子裂纹和断裂起到重要作用, 换能器是超声波检测的基础元件, 而换能器的核心部件是压电陶瓷晶片, 其性能直接影响到检测结果。该文研究针对有限元法和传统解析法在压电陶瓷晶片特性分析中的不足, 采用 ANSYS 有限元分析软件对压电陶瓷锆钛酸铅(PZT)晶片进行特性分析, 基于 ANSYS 的电-结构耦合场模型, 对超声波换能器的矩形压电晶片进行静态、模态、谐波响应和瞬态分析。通过模态分析和谐波响应分析可得到晶片的一阶纵向振动和二阶弯曲振动的固有频率、振型及频率位移响应及影响因素等信息, 研究结果对提高超声辐射功率及超声换能器的性能有一定的理论指导和工程应用价值。

关键词: 超声波检测; 压电晶片; 有限元分析; 电-结构耦合场; 模态和谐波响应分析

中图分类号: TP204; TM282

文献标识码: A

Simulation Analysis of Piezoelectric Ceramic Chip PZT Based on ANSYS

FAN Xingming, MA Shiwei, ZHANG Xin, LI Zhen

(Dept. of Electrical Engineering & Automation, Guilin University of Electronic and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Ultrasonic testing with power pillar insulator has played an important role in preventing and detecting the crack and preventing fracture. Ultrasonic transducer is the basis of the test components, and the piezoelectric ceramic chip is the core components, its performance directly affect the test results. In order to avoid the shortage in traditional analytic method and the finite element analysis (FEA) in the analysis of piezoelectric ceramic chip, the software ANSYS analysis was used in the piezoelectric ceramic chip. Based on the electric-structure coupling model, the static, modal, harmonic response and transient state simulation was used in the rectangular piezoelectric ceramic chip of ultrasonic transducer. The natural frequencies, vibration mode, frequency displacement response of the wafer were analyzed through the ANSYS-based finite element analysis including the modal and harmonic response analysis of the piezoelectric ceramic chip. The research results would help to improve the performance of ultrasonic radiation power and ultrasonic transducer with certain theoretical guidance and engineering application value.

Key words: ultrasonic testing; piezoelectric ceramic chip; finite element analysis; electric and structure coupling; model and harmonic response analysis

0 引言

近年来超声波探伤技术在电力支柱瓷绝缘子的状态检测领域得到初步应用并具有较好的发展前景, 通常采用纵波和爬波法并基于不同的超声换能器来实现瓷绝缘子不同部位的检测^[1-2]。常用的锆钛酸铅(PZT)晶片是换能器的核心部件, 其作用是实现电能和声能的相互转换, 被广泛应用于超声检测及超声波电机等领域^[3]。目前压电陶瓷类结构的研究主要有解析法和有限元法。解析法需采用多种简化假设, 公式推导繁琐, 一般较难得到求解问题的解析解; 而有限元法计算量较大, 编制的特定求解程

序通用性较差^[4]。

压电陶瓷片以其双向机-电耦合特性, 在电网支柱瓷绝缘子无损检测中具有独特的优势, 是目前国内外研究的热点。机-电耦合方面的理论研究仍不够深入, 鉴于耦合作用的影响, 大多数工作只能在特殊情形下进行, 对于一般情形下很难得到显性解, 于是工作转向有限元分析。在压电陶瓷技术应用于支柱瓷绝缘子探伤中, 压电晶片的边界条件及应力情况较复杂。本文研究工作使用有限元分析软件 ANSYS12.0, 对检测绝缘子所用超声换能器陶瓷晶片 PZT-4 的耦合效应进行有限元分析, 通过模态分

收稿日期: 2013-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51067002, 51167004); 广西科学研究与技术开发基金资助项目(桂科重 1348003-8); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任课题基金资助项目(13-051-09-002Z)

作者简介: 范兴明(1978-), 男, 山东武城县人, 教授, 博士, 主要从事智能化电器、高电压新技术的研究。通信作者: 张鑫(1976-), 女, 河北晋县人, 讲师, 主要从事智能化电器的研究。zhangxin_wt@163.com

析和谐响应分析得到晶片的一阶纵向振动和二阶弯曲振动的固有频率、振型及频率位移响应等信息,结果表明 ANSYS 软件能很好地解决压电晶片的自由度及压电耦合问题,为超声波换能器特性的研究及其在电力绝缘子探伤应用提供一定的参考和借鉴。

1 压电陶瓷锆钛酸铅(PZT)ANSYS 耦合场分析

压电分析考虑结构和电场的相互作用,求解出质点位移与其电压分布之间的关系。ANSYS 中可采用的直接耦合单元有 SOLID5、PLANE13 和 SOLID226 等。本文工作选用 SOLID5 单元进行压电分析,SOLID5 为八节点六面体单元,每个节点具有 6 个自由度,分析中对温度和磁场自由度不作计算。图 1 为 PZT 晶片 ANSYS 特性分析的流程[4],其中第 2 步的压电分析是结构与电场之间的耦合,因此在选择分析结果时应选择结构-电分析类型。图中首先选择多物理场仿真进入软件系统,定义 PZT 的实体模型并定义材料属性,然后选择 SOLID5 单元并定义结构-电分析类型,划分网格使其生成 ANSYS 分析模型,分别选择所要分析类型并设置边界条件及加载电压载荷,最后求解后通过后处理单元提取分析结果[5]。

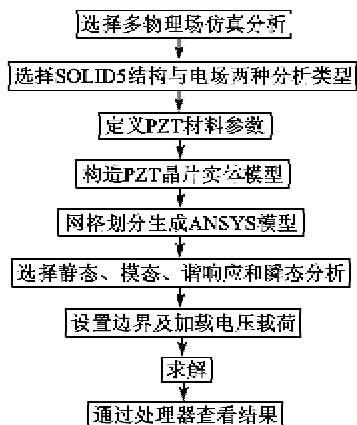


图1 PZT 晶片 ANSYS 特性分析流程图

2 结构特性分析的有限元理论

耦合场单元包含了所有必须的自由度,通过计算相关单位负载向量(向量耦合)或单位矩阵(矩阵耦合)来处理耦合问题。在线性矩阵耦合问题中,耦合场作用只需迭代一次;对于负载耦合,则需迭代两次。而对于非线性问题一般需对负载耦合和矩阵进行重复迭代[6]。压电方程是描述压电材料力学量和电学量之间的关系方程,根据不同的边界条件可分为四组压电方程。针对压电材料的各向同性,其力学量(应变和应力)和电学量(电场强度和电位移)之间的耦合关系,本文采用第二组 e 型压电方程[7],边

界条件为电学短路和机械夹持:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^S \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^E \mathbf{S} + \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}$ 为机械应变向量; $\mathbf{T}$ 为机械应力向量; $\mathbf{D}$ 为电位移向量; $\mathbf{E}$ 为电场强度向量; $\mathbf{c}^E = \left\{ \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{S}} \right\}_E$ 为弹性矩阵; $\mathbf{e}^S = \left\{ \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{E}} \right\}_S$ 为压电应力矩阵; $\mathbf{e}^E = \left\{ \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{S}} \right\}_E$ 为压电应力矩阵的转置矩阵; $\boldsymbol{\epsilon}^S = \left\{ \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{E}} \right\}_S$ 为介电常数矩阵。当加载电压后,可设机械应力引起的位移为 0,位移全部来自于电场强度作用,从而可根据式(1)、(2)求得材料的应变和应力向量。

在用有限元法对一个连续质量结构进行动态分析时,首先将该结构离散为一个由有限单元组成的模型,求出单元质量矩阵 $\mathbf{m}$ 和刚度矩阵 $\mathbf{k}$,然后按照节点自由度序号对质量矩阵和刚度矩阵进行组集,得到总的质量矩阵 $\mathbf{M}$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K}$,针对小阻尼结构,可采用复合阻尼 $\mathbf{C}$,得出结构体的振动微分方程[8]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

式中: $\ddot{\mathbf{q}}$ 为加速度向量; $\dot{\mathbf{q}}$ 为速度向量; $\mathbf{q}$ 为节点位移向量; $\mathbf{F}(t)$ 为瞬态载荷向量。 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 在结构参数和网格生成后已确定,根据式(3)通过迭代求解出各个质点的随时间变化的位移。在求解压电晶片结构固有频率和振型时,可不考虑阻尼,则式(3)可简化为无阻尼振动方程[8]:

$$(-W^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{q} = 0 \quad (4)$$

式中 W 为振动的固有频率,特征方程为

$$[-W^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}] = 0 \quad (5)$$

展开该行列式得到关于 W^2 的 n 次多项式,其特征值则为离散模型的固有频率,将特征值代入式(4),可求出特征向量,由此求解出给定频率下的振型,从而可得到各阶振型参数及相对应的频率特征。

3 PZT 仿真建模与分析

3.1 PZT 晶片模型建立

支柱绝缘子超声检测换能器核心部件由铜片和 PZT 压电晶片材料两部分组成,PZT 表面铜片的作用是对晶片施加电极,在晶片表面形成等势面,图 2 为超声纵波检测直探头的结构图[9]。探头通过导线与晶片表面的铜片连接,为晶片振动提供激励电压。吸收层通常是由钨粉和环氧树脂制成的阻尼块,其作用是吸收向后发射的超声波并限制晶片振动。匹配电感用于使探头与仪器的发射电路匹配,提高发射效率。声匹配材料一方面可防止晶片的磨损、碰伤,另外便于晶片与被测材料之间超声的有效传

播^[10]。检测支柱绝缘子所使用的超声频率多集中在1~5 MHz^[11],本文对实际模型进行了简化,只针对陶瓷晶片进行ANSYS模拟仿真。通过对晶片的仿真计算,得到晶片各阶振型、固有频率和谐响应等信息,从而验证晶片是否满足超声纵波直探头对振型的要求,并可在电压幅值不变时通过改变其激励电压频率来提高晶片的超声辐射能量。仿真所用晶片为厚度方向极化,边界条件为沿4个侧面边界固定,具体简化后的PZT晶片仿真模型如图3所示。

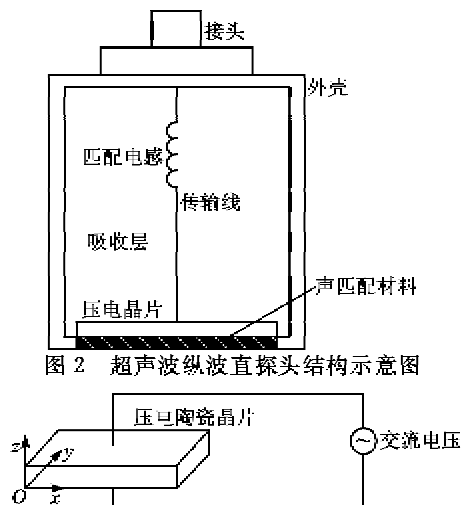


图2 超声波纵波直探头结构示意图

图3 晶片简化仿真模型

本文对单一压电陶瓷振子PZT-4进行模拟分析,因其高激励性能常被用于超声波支柱绝缘子纵波直探头,该压电晶片的材料密度为 $\rho=7\,500\text{ kg/m}^3$,尺寸为 $10\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,其他的晶片材料

参数^[12]:介电矩阵 $\epsilon=\begin{bmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{bmatrix}$,压

电矩阵 $d=\begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}\text{ C/m}^2$, $K=\begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 1.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix}\times 10^{10}\text{ N/m}^2$ 。

材料参数包括单元类型的选定和对材料属性的赋值,这里选择SOLID5。先新建一个长为0.01 m,

宽为0.006 m,高为0.001 m的长方体,然后根据材料属性为所建模型定义材料的介电常数、压电常数和刚度常数。最后对长方体实体模型进行网格划分,设定网格长度为0.000 5 m,其长、宽、高分别划分为20、12和2份,共生成819个节点和480单元,图4为其有限元模型。

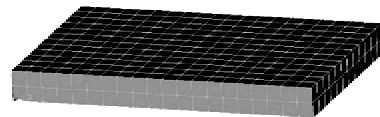


图4 压电晶片的有限元模型

3.2 加载与求解

3.2.1 PZT晶片静态分析

进行超声换能器PZT晶片沿 z 方向极化的厚度振动模式的静态分析,需根据换能器实际结构中晶片的边界条件,对矩形压电片4个侧面施加全方向位移约束。在PZT晶片上表面施加-200 V电压,下表面接地,使得PZT晶片在静电场中产生形变,图5为晶片的形变和应力分布的仿真结果。

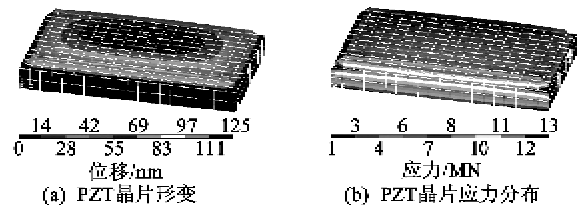


图5 PZT晶片正向电压静态分析

由图5可知,晶片内部质点向 z 轴正方向移动,中部质点位移量最大为 $0.125\text{ }\mu\text{m}$ 。由于中部质点相距4个侧面约束较远,且形变释放了大部分应力,因此4个侧面与上表面交界处的应力强度最大,中部应力相对较小。当对晶片上表面施加200 V电压,下表面接地时,由于加载的电场方向发生改变,因此晶片内部质点会向 z 轴负方向移动,图6为晶片形变和受力分布图。

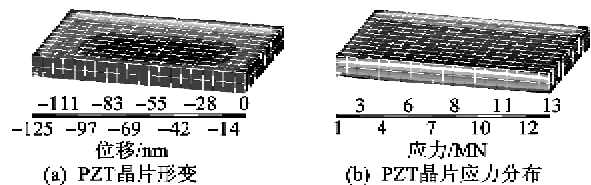


图6 PZT晶片反向电压静态分析

图7为晶片下表面接地,对上表面施加不同幅值和方向的激励电压时,上表面中间节点506的 z 方向位移幅值。由统计结果可知,加载在晶片上表面的电压与节点 z 方向位移成线性关系。为防止晶片内部质点位移幅值过大而导致其断裂,用于支柱绝缘子检测中的超声换能器晶片加载电压幅值通常约为200 V,不宜超过300 V。

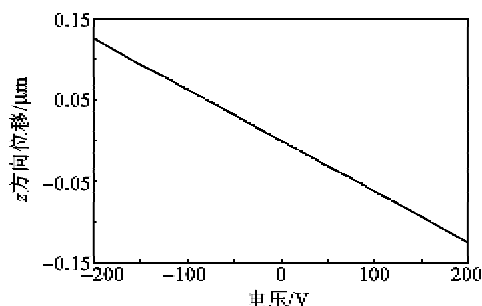


图7 晶片节点在不同电压激励下的形变值

3.2.2 PZT 晶片模态分析

超声换能器的工作模式应该为晶片沿厚度方向上下振动,紧贴支柱绝缘子瓷壁从而将超声波发射到瓷瓶中,因此必须避免晶片以其他模式振动,所以需对晶片的振动模态进行了分析。本文具体的模态分析采用了计算速度和精度较高的 Lanczos 向量直接叠加法,计算前 10 阶振动模态。选取频率在 1~5 MHz 内进行模态进行研究,图 8 为 PZT 晶片的一阶纵向振动和二阶弯曲振动图形。

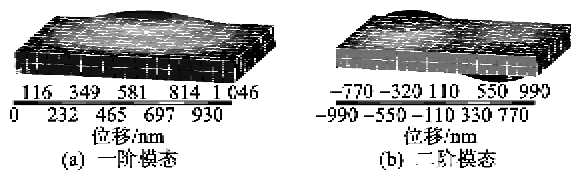


图8 PZT 晶片模态分析

由图 8 可知,晶片的一阶模态固有频率为 100 074 Hz,表 1 为分析计算得到的前 6 阶模态固有频率。由于在应用超声波检测绝缘子时换能器的工作频率在 1~5 MHz 内,因此避开了晶片前 6 阶固有频率。如常用的支柱绝缘子检测中换能器在 2.5 MHz 爬波或 5 MHz 纵波工作状态时,晶片将会以一阶振动模式振动,因此可满足超声波换能器对振型的要求。

表1 压电晶片的各阶固有频率

振动阶数	1	2	3
固有频率/ μ Hz	0.100 07	0.140 23	0.199 70
振动阶数	4	5	6
固有频率/ μ Hz	0.205 09	0.219 13	0.250 22

3.2.3 PZT 晶片谐响应分析

超声换能器的辐射声压很小,在加载固定幅值正弦电压信号时应尽可能使晶片振动幅值增大,从而提高辐射声能。而谐响应分析是用于确定材料结构在承受载荷随时间正弦规律变化时的稳态响应分析技术,目的是计算结构在不同频率下的响应,并得到响应值对应频率的曲线。图 9 为基于 ANSYS 谐响应计算得到的压电晶片节点 506 随频率变化时对应的 z 方向上的响应曲线。由图可知,在频率

1.8 MHz 和 4.3 MHz 下晶片产生共振,其响应幅值较大,用于支柱绝缘子探伤时缺陷反射回波的幅值也会相对较大,此时可便于缺陷的辨认。因此,超声换能器的晶片尺寸为 10 mm×6 mm×1 mm 时,应尽可能使晶片工作的中心频率在 1.8 MHz 和 4.3 MHz 两频率点附近,从而达到提高换能器声辐射能量的效果。

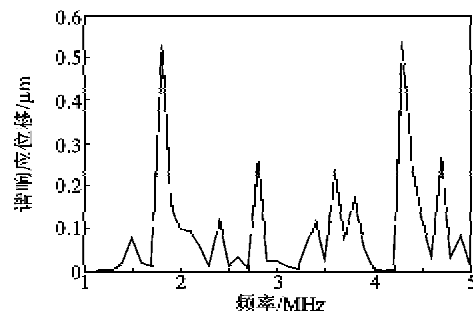


图9 晶片节点的位移响应曲线

3.2.4 PZT 晶片瞬态分析

此处利用牛顿法对 PZT 晶片进行瞬态分析,其中忽略阻尼项的影响,将瞬态分析的积分参数设置为:二阶瞬态积分参数 $\alpha=0.25$, $\delta=0.5$,一阶瞬态积分参数 $\theta=0.5$,其他参数使用 ANSYS 设定的默认值^[12]。对 PZT 晶片施加幅值为 200 V、频率为 2.5 MHz 和初相角为 0° 的正弦电压,利用 ANSYS 时间历程后处理单元 POST26 提取晶片上各点的位移图形,得到表面中间的节点 506 沿 z 方向的位移幅值随时间变化情况,如图 10 所示。

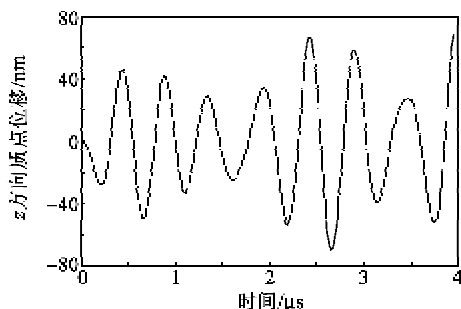


图10 晶片节点的瞬态响应曲线

由图 10 可知,晶片在幅值为 200 V 的正弦电压激励下将会作周期上、下振动,验证了换能器晶片超声波的发射。由于加载电压频率较高,因此 ANSYS^[14]在做瞬态计算时周期和幅值会出现微小波动,波动在可接受范围内,可忽略不计。因此得出,发射电路在晶片上施加不同频率的正弦电压激励时,晶片会在给定频率下沿厚度方向振动,即实现不同频率超声波的发射。在晶片前端添加如聚酰亚胺聚合物等声匹配材料,后端加上声吸收块,在晶片上

连接电极引线并在外层附上金属外壳,即可制作成为用于支柱瓷绝缘子检测的超声波换能器件。

4 结束语

本文针对支柱瓷绝缘子超声波纵波直探头中所使用的压电陶瓷晶片进行了 ANSYS 有限元仿真,利用 ANSYS 元件库中的 SOLID5 单元,采用直接耦合法对晶片进行压电耦合场仿真分析。通过对压电晶片的静态、模态、谐响应及瞬态仿真分析,得到了在长、宽、高分别为 $10\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 晶片尺寸下的一阶纵向振动和二阶弯曲振动的固有频率、共振频率以及频率位移响应曲线等信息,验证了超声波换能器在 2.5 MHz 工作频率下对晶片振型的要求和超声纵波的发射,所得仿真结果为提高换能器声辐射功率和优化换能器性能提供了有效支持,对支柱绝缘子超声检测换能器的研制有一定的理论指导和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李晓红,王敏,吴敏,等.支柱瓷绝缘子的超声检测有效性[J].中国电机工程学报,2006,26(9):159-163.
LI Xiaohong, WANG Min, WU Min, et al. Ultrasonic testing validity of porcelain post insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 159-163.
- [2] 郝艳捧,谢恒堃.高压电力设备绝缘诊断的声学检测技术[J].电工电能新技术,2003,22(2):51-55.
HAO Yanpeng, XIE Hengkun. Acoustic diagnostic techniques of electrical insulation for HV power equipment[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(2): 51-55.
- [3] 朱华,陈超,赵淳生.一种微型柱体超声电机的研究[J].中国电机工程学报,2006,26(12):128-133.
ZHU Hua, CHEN Chao, ZHAO Chunsheng. Investigation on a cylindrical ultrasonic micro motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 128-133.
- [4] 梁磊,王少萍,曹锋.基于 ANSYS 的压电陶瓷 PLZT 特性仿真分析[J].北京航空航天大学学报,2008,34(7):853-856.
LIANG Lei, WANG Shaoping, CAO Feng. Analysis of piezoelectric ceramics PLZT based on ANSYS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 853-856.
- [5] 翟国富,毕勇,许峰,等.采用有限元分析电网谐波对断路器动作特性的影响[J].中国电机工程学报,2003,23(1):112-115.
ZHAI Guofu, BI Yong, XU Feng, et al. Power network harmonic's effect on operation characteristic of circuit breaker with finite element analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 112-115.
- [6] 姜德义,郑拯宇,李林,等.压电陶瓷片耦合振动模态的 ANSYS 模拟分析[J].传感技术学报,2003,16(4):452-456.
JIANG Deyi, ZHENG Zhengyu, LI Lin, et al. The analyses of the vibration model of piezoelectric ceramic piece based on ANSYS[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003, 16(4): 452-456.
- [7] 何涛焱,龙士国,刘鹏,等.背衬对压电传感器瞬态特性影响的模拟研究[J].压电与声光,2011,33(1):100-104.
HE Taotao, LONG Shiguo, LIU Peng, et al. Simulation study of the effect of backing on the transient properties of piezoelectric transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(1): 100-104.
- [8] 杨超华,阮世勋.以 ANSYS 进行扭振超声变幅杆振动特性分析[C]//温州:2005 年全国功率超声论文集,2005.
- [9] 蒋云,王维东,蔡红生.支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [10] 王庆锋,吴斌,焦敬品,等.一种声发射传感器的研制[J].压电与声光,2007,29(2):179-181.
WANG Qingfeng, WU Bin, JIAO Jingpin, et al. Design of a kind of acoustic emission sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(2): 179-181.
- [11] 王维东,刘勇.支柱绝缘子及瓷套超声波探伤工艺方法研究[J].无损检测,2006,28(9):460-462.
WANG Weidong, LIU Yong. Research on ultrasonic inspection technique of pillar insulators and porcelain cover[J]. Non-destructive Testing, 2006, 28(9): 460-462.
- [12] 吕航,范明庆,孙超,等.基于 ANSYS 的矩形压电振子瞬态特性分析[J].微特电机,2012,40(3):34-37.
LV Hang, FAN Mingqing, SUN Chao, et al. Transient analysis on rectangular piezoelectric vibrator based on ANSYS[J]. Small & Special Electrical Machines, 2012, 40(3): 34-37.
- [13] 王豪,贺国,明廷锋.船用超声液位传感器的压电陶瓷瞬态特性分析[J].机电工程,2011,28(11):1404-1408.
WANG Hao, HE Guo, MING Tingfeng. Analysis of transient characteristics for shipborne piezoelectric ceramic of ultrasonic liquid level transducer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(11): 1404-1408.
- [14] 王智祥,谭珊.应用 ANSYS 的轻轨道岔梁有限元分析[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2013,27(7):37-40.
WANG Zhixiang, TAN Shan. Light rail turnouts beam finite element analysis based on ANSYS[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2013, 27(7): 37-40.