



# 压电换能器瞬态接收特性的有限元模拟研究

基金项目：国家自然科学基金项目(10702057)；湖南省自然科学基金项目(09JJ3003)

**摘要：**接收信号在压电换能器压电层中的多次反射及波形转换对超声检测的灵敏度和分辨率有重要影响，如何优化阻尼结构与材料参数是提高压电换能器接收性能的关键之一。本文用 ANSYS 有限元软件中的力-电耦合瞬态模拟方法，研究了压电直探头中阻尼结构的几何尺寸及声阻抗对其瞬态响应的影响，得到了压电换能器中不同时刻的弹性波场、电场分布以及输出电压响应曲线，揭示了换能器瞬态响应产生的多次反射波对其检测灵敏度和分辨率的影响。研究结果表明：通过改进的阻尼结构与材料参数对消减接收信号的多次反射，缩短余振时间具有明显的作用，也可以大大降低换能器的研发周期和成本。

**关键词：**压电换能器；力-电耦合有限元；优化设计；瞬态响应

中图分类号：TB552 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2010)02-0006-05

▶▶ 何涛焘 龙士国 刘鹏 李要

## 一、引言

近年来，无损检测技术在工业中的应用越来越普遍，已成为确保产品质量和设备运行安全的重要手段，其水平的高低是一个国家工业发达程度的重要标志<sup>[1]</sup>。超声检测技术具有穿透能力强、设备简单、使用条件和安全性好、检测深度大等优点，是目前应用最广泛、使用频率最高的无损检测技术之一<sup>[2-3]</sup>。超声无损检测系统一般由发射换能器、数据采集器，接收换能器和数据处理软件等部分组成，其中压电换能器以其良好的接收性能成为超声无损检测系统的重要组成部分。这使得压电换能器在检测应用中的理论探讨和实验制作受到广泛重视<sup>[4-9]</sup>。

随着数值计算水平的发展以及计算机性能的提高，有限元计算方法在超声检测领域中获得了广泛应用<sup>[10]</sup>。其中国内外学者主要集中在超声波在介质中的传播、声场与缺陷的用作以及压电探头稳态特性的模拟上<sup>[11-15]</sup>，然而超声检测用压电换能器多数是在瞬态状态下工作，对其瞬态特性的研究，是检测超声学的重要内容<sup>[6]</sup>。接收信号在换能器压电层中的多次反射及波形转换对超声检测的灵敏度和分辨率有重要影响<sup>[8]</sup>，因此运用有限元软件分析阻尼结构对压电探头瞬态接收特性的影响，是优化阻尼结构与材料参数重要方法之一。相比与传统的理论及试验方法，应用此有限元软件设计分析换能器的突出优点不受阻尼结构及材料参数的限制，可进行复杂结构换能器的设计；其次，可以方便地改变各种参数来进行进一步的研究，或对已有的工艺参数进行优化，可以大大缩短研发成本和周期<sup>[7]</sup>。2007年，Yago等<sup>[16]</sup>运用有限元软件分析了压电陶瓷片的瞬态接收特性，然而其并没有建立完整的换能器模型(匹配层、背衬、外壳)。

本文用ANSYS有限元软件中的力-电耦合瞬态模拟方法，研究压电直探头中阻尼结构的几何尺寸及声阻抗对其瞬态响应的影响。

## 二、ANSYS分析压电换能器的基本理论

ANSYS 有限元分析软件是能够实现前后处理, 分析求解及力-电耦合场瞬态分析的大型有限元软件之一。近年来, ANSYS 已成为国际公认的适用于压电换能器模拟分析的软件工具之一<sup>[17]</sup>。

### 1、压电本构方程

压电材料的力学量(应力和应变)和电学量(电场强度和电位移)之间存在着耦合关系, 用压电方程表示如下<sup>[9]</sup>:

$$\{T\} = [c]\{S\} - [e]\{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [e]^T\{S\} + [\varepsilon]\{E\} \quad (2)$$

式中:  $\{T\}$ —应力矢量;

$\{D\}$ —电位移矢量;

$\{S\}$ —应变矢量;

$\{E\}$ —电场强度矢量;

$[c]$ —弹性矩阵;

$[e]$ —压电应力矩阵;

$[\varepsilon]$ —介电常数矩阵。

### 2、瞬态结构力学分析有限元方程

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

式中,  $[M]$ —系统的质量矩阵;

$[C]$ —系统的阻尼矩阵;

$[K]$ —系统的刚度矩阵。

$\{u\}$ —节点位移矢量;

$\{F(t)\}$ —瞬态载荷矢量。

在结构参数和网格生成后,  $[M]$ 质量矩阵、 $[C]$ 阻尼矩阵、 $[K]$ 刚度矩阵已经完全确定。

### 3、单个单元的耦合有限元矩阵

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^z] \\ [K^z]^T & [K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\{u\}$ —结构位移向量;  $\{\dot{u}\}$  为对时间的一阶导数,  $\{\ddot{u}\}$  为对时间的二阶导数;

$\{V\}$ —压电体节点电位向量,  $\{\dot{V}\}$  为对时间的一阶导数,  $\{\ddot{V}\}$  为对时间的二阶导数;

$[M]$ —质量矩阵;

$[K]$ —结构刚度矩阵;

$[K^d]$ —介电常数矩阵;

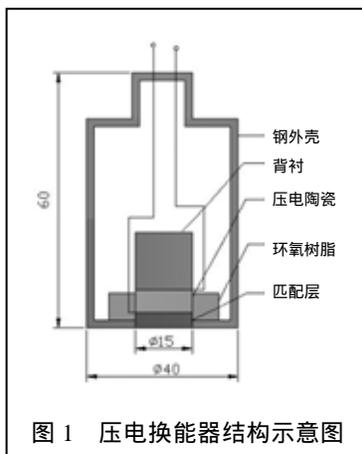


图 1 压电换能器结构示意图

$[K^z]$ —压电耦合矩阵<sup>[17]</sup>。

## 三、压电换能器有限元模型的建立

### 1、压电换能器的几何尺寸及材料参数

本文所研究的压电纵波直探头由匹配层、压电陶瓷、阻尼结构(背衬和环氧树脂)以及起保护作用的外壳组成, 其结构如图 1 所示。压电陶瓷选用接收性能较好的 PZT5A, 匹配层和外壳材料分别选取铝和钢。换能器各部分材料特性如表 1 和表 2 所示。

表 1: 压电换能器的材料特性

材料类型	密度(kg/m <sup>3</sup> )	声速(m/s)	声阻抗(MRaly)
PZT 5A	7750	4400	33.704
钢	7840	5750	45.080
铝	2770	6400	17.728

表 2: PZT5A 的材料常数

弹性常数( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	压电常数(N/V*m)	介电常数( $\times 10^{-9}$ C/m)
$C_{11}=12.035$ $C_{33}=11.087$	$e_{31}=-5.351$	$\varepsilon_{11}=826$
$C_{12}=7.518$ $C_{44}=2.258$	$e_{33}=15.784$	$\varepsilon_{33}=919$
$C_{13}=7.509$ $C_{66}=2.105$	$e_{15}=12.295$	

### 2、单元选择与网格划分

利用换能器具有轴对称性, 采用简化的二维有限元模型, 既能保证精度要求又减少了计算时间。首先确定构成压电换能器各种材料单元的类型。压电陶瓷选择 plane13 单元, plane13 为 4 个节点 2D 四边形耦合场单元, 可用于具有耦合物理场的各向异性材料的建模, 其他结构采用 4 节点 plane42 单元, 并略去粘结层、上下电极片的影响, 即压电陶瓷和阻尼层、匹配层单元在粘结层上, 它们的位移和力是连续的。

从物理意义上说, 连续体离散化后将引起两种不利的效应, 一种称之为“低通效应”, 另一种称之为“频散效应”, 都将使波的传播性质发生变化。但是, 理论和实践证明, 当网格尺寸划分的足够小时, 用有限元离散模型代替连续介质模型求解引起的误差通常可忽略不计<sup>[18]</sup>。在 ANSYS 中, 如果对波传播感兴趣, 网格密度应当划分到足以算出波动效应, 即沿波的传播方向每一波长

至少有 20 个单元。时域积分时间步长应当小到当波在单元之间传播时足以捕捉到波<sup>[19]</sup>。本文采用频率为 200 kHz 的 4 周期正弦脉冲模拟换能器的接收信号，时间步长为 0.25  $\mu\text{s}$ ，最小网格单元尺寸为 0.1 mm，模拟时间为 120  $\mu\text{s}$ 。图 2(a)为网格划分完成后的 2 维有限元模型，为了直观的显示换能器的结构，我们给出了其 3 维结构模型，如图 2(b)所示。

### 3、力-电耦合瞬态模拟步骤

在本文的模拟中，为了研究压电直探头中阻尼结构的几何尺寸及声阻抗对其瞬态响应的影响，填充物环氧树脂及背衬的直径、厚度、声阻抗为可变量，变化范围如表 3 所示，其中直径与厚度以 1 mm 递增，声阻抗以 5 MRaly 递增。表中  $t_1$ 、 $r_1$ 、 $Z$  分别表示背衬厚度、半径和声阻抗， $t_2$ 、 $r_2$  分别表示环氧树脂层的厚度、半径。匹配层和压电层的厚度、直径为常量，其直径均为 15 mm，厚度分别为 3 mm、6 mm。

## 四、模拟结果与讨论

模拟实验采用的部分阻尼结构尺寸参数如表 4 所示。

为了更清晰的观察接收信号在换能器中不同时刻的波场及电场分布，我们对有限元模型进行了局部放大并略去外壳单元，如图 3、图 4 所示。图 3 显示了选取阻尼结构 b 时，换能器模型在 0.45 $\mu\text{s}$ 、1.0 $\mu\text{s}$  时的波场分布。从图中可以看出，由于压电换能器各部分的结构尺寸和声阻抗不同，接收信号在换能器压电层中产生了多次反射、透射以及波形转换（边缘波）。图中波场分布与文献<sup>[20-21]</sup>中实验及模拟超声波在同种介质中传播的波场是相一致的。与图 3 对应，图 4 分别显示了 0.6 $\mu\text{s}$  和 1.0 $\mu\text{s}$  时压电层的电场分布。从图 4(b) 可以看出，由于接收信号多次反射的影响，压电层电场与波场呈现相同的反射趋势，这将使电压响应曲线余振较长，降低其检查分辨率。

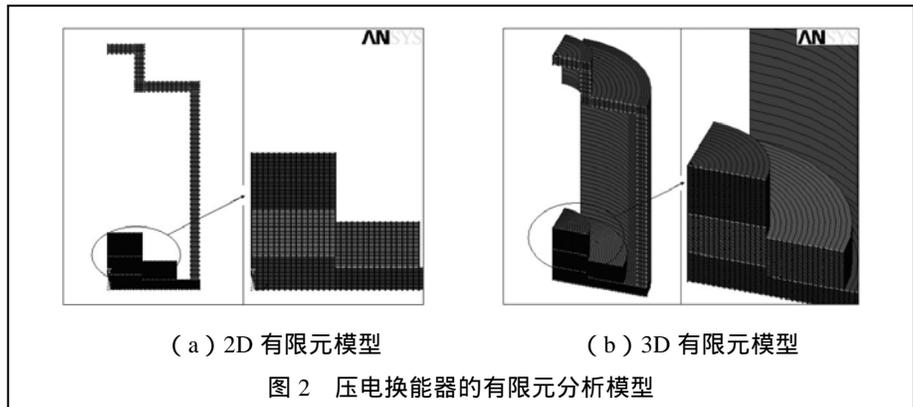


图 2 压电换能器的有限元分析模型

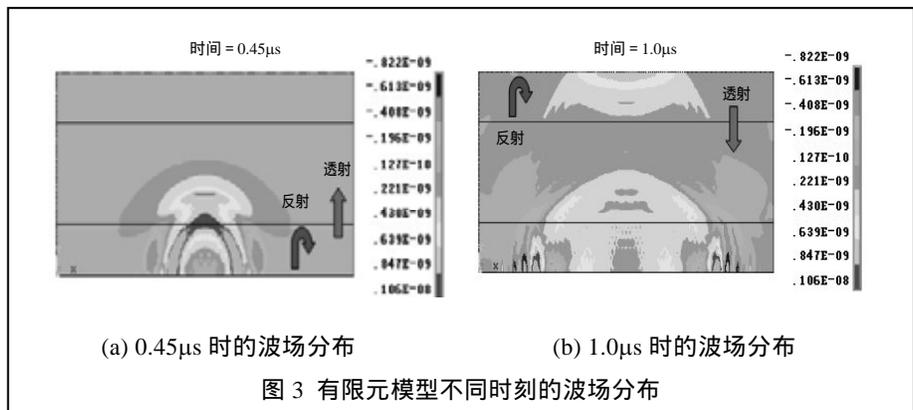


图 3 有限元模型不同时刻的波场分布

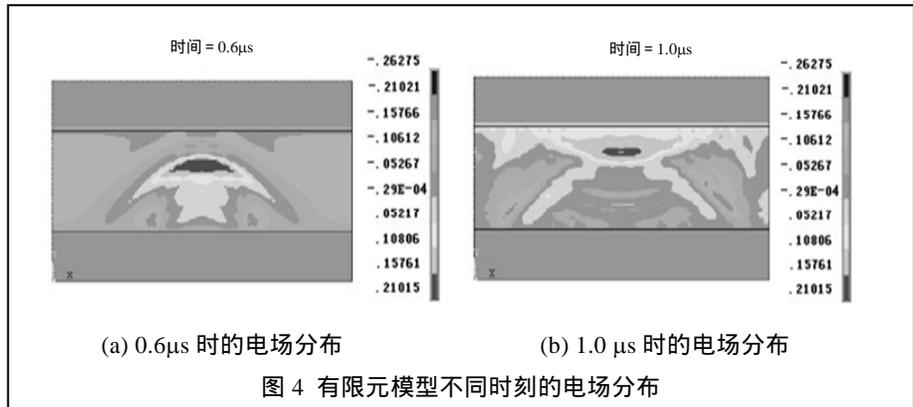


图 4 有限元模型不同时刻的电场分布

表 3 压电换能器阻尼结构参数变化范围

参数	$t_1(\text{mm})$	$r_1(\text{mm})$	$Z(\text{MRaly})$	$t_2(\text{mm})$	$r_2(\text{mm})$
变化范围	1~10	15~20	5~45	0~7	8~18

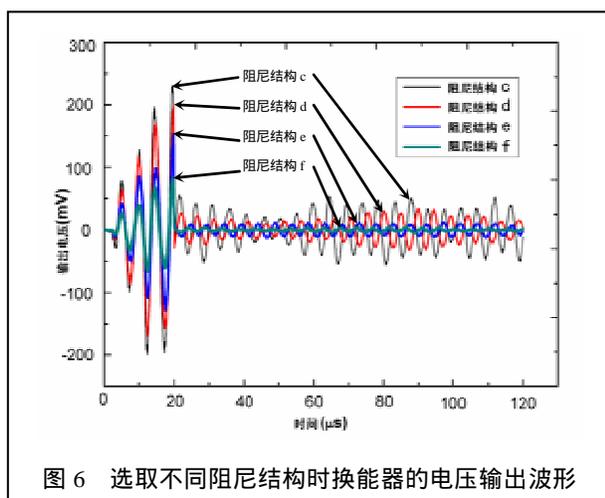
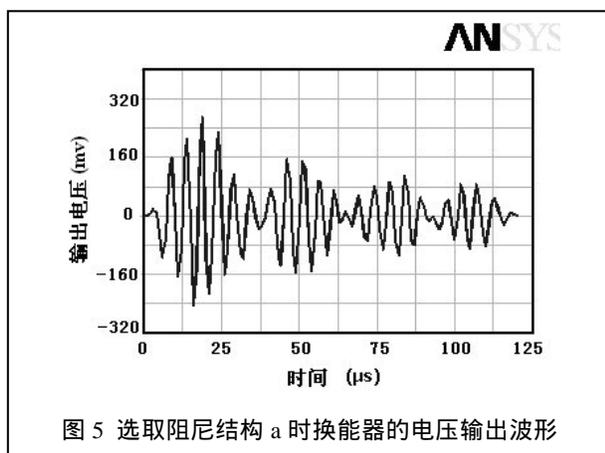
表 4 部分阻尼结构的尺寸及材料参数

阻尼结构代号	参数				
	$t_1(\text{mm})$	$r_1(\text{mm})$	$Z(\text{MRaly})$	$t_2(\text{mm})$	$r_2(\text{mm})$
a	1	15	35	0	0
b	3	15	35	0	0
c	6	15	35	0	0
d	6	15	35	3	12
e	6	15	35	5	16
f	10	20	45	7	18

图 5 显示了选取阻尼结构 a (见表 4) 时, 换能器的电压响应曲线, 其峰峰值电压为 519 mV。从图中可以看出接收信号的多次反射及边缘波的产生使响应曲线余振较长, 幅值较大。这就可能与下一信号叠加, 会对检测结果影响很大, 从而大大降低了检测的纵向分辨率。

图 6 显示了选取阻尼结构 c、d、e、f 时换能器的输出电压响应曲线。从阻尼结构 c 的电压响应曲线可以看出: 增加背衬厚度可以提高换能器的声学衰减性能, 有效降低响应曲线余振的时长和幅值。然而值得注意的是其最大峰峰值输出电压为 436mV, 与阻尼结构 a 相比灵敏度降低了 83mV。可见, 增加背衬厚度在一定程度上降低了换能器的灵敏度。

为了进一步为了消除多次反射及边缘波的影响, 我们在阻尼结构 c 的基础上, 填充厚度、半径分别为 3 mm、12 mm 的环氧树脂, 测得换能器的电压响应曲线, 如图 6 中 d 所示。从模拟结果可以看出: 添加环氧树脂层进一步降低了响应曲线余振的时长和幅值, 与此同时其最大峰峰值输出电压为 361mV, 与阻尼结构 c 相比灵敏度降



低了 75 mV。

相比于阻尼结构 d, 将环氧树脂的厚度、半径分别增至 5 mm、16 mm 时, 测得换能器的电压响应曲线, 如图 6 中 e 所示。从图中可以看出: 随着环氧树脂体积的增加, 输出波形得到了进一步的改善, 余振的时长和幅值很小, 基本消除了多次反射及边缘波的影响, 其最大峰峰值电压为 288 mV, 相比阻尼结构 d 灵敏度降低了 73 mV。可见, 合理选择环氧树脂的结构参数可以使换能器达到比较好的接收性能。

在阻尼结构 f 中, 测得其电压响应曲线如图 6f 所示。从模拟结果可以看出: 输出曲线基本可以忽略余振对检测分辨率的影响, 然而其最大峰峰值电压为 148 mV, 相比阻尼结构 e 灵敏度降低了 83 mV, 这极大的降低了检测的灵敏度。可见, 大量添加阻尼材料、选用高阻抗背衬固然能使脉冲变窄, 提高检测分辨率, 减小检测盲区、波形畸变, 但这在很大程度上是以牺牲检测灵敏度为代价的。这就要求我们在检测过程中, 应该根据实际需要合理选择阻尼结构的尺寸和材料参数。

## 五、结论

本文利用 ANSYS 软件建立了超声检测用压电换能器的有限元模型, 并针对换能器的实际结构, 对其进行了瞬态接收特性的模拟仿真。通过不同时刻的波场、电场分布图以及输出压电响应曲线, 分析了换能器中阻尼结构的几何尺寸及声阻抗对检测灵敏度和分辨率的影响。

1、合理选择阻尼结构的几何尺寸及声阻抗, 可以有效地提高换能器的分辨率, 减少灵敏度损失;

2、应用 ANSYS 有限元分析方法可以方便的选择不同类型的激励信号, 改变换能器的各部分的结构尺寸、材料参数, 这为研究高性能换能器提供了可行的方法。

## 参考文献

- [1] 黎连修. 超声检测技术在中国[J]. 无损检测, 2008, 30(4): 791-795.
- [2] 罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 148-152.
- [3] 梁宏宝, 朱安庆, 赵玲. 超声检测技术的最新研究与应用[J]. 无损检测, 2008, 30(3): 174-177.
- [4] 陈永强, 钟核俊, 牛向东等. 超声换能器性能对检测质量的影响[J]. 无损检测, 1999, 21(11): 494-496.
- [5] 王务同, 蒋危平. 超声波探伤换能器的重要性[J]. 无损检测, 1995, 17(1): 1-4.
- [6] 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.

[7] 林书玉. 超声技术的基石——超声换能器的原理及设计[J]. 物理, 2009, 38(3):141-148.

[8] Noboru Ichinose, Naohiko Miyamoto, Sadayuki Takahashi. Ultrasonic transducers with functionally graded piezoelectric ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004(24): 1681-1685.

[9] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.

[10] 陈建忠, 史耀武. 超声检测过程的数值模拟[J]. 无损检测, 2001, 23(5): 198-201.

[11] R. Hill, S.A. Forsyth, P. Macey. Finite element modeling of ultrasound, with reference to transducers and AE waves[J]. Ultrasonics, 2004, (42): 253-258.

[12] H. Fukutomi. Development of multifunctional ultrasonic inspection system and numerical modeling of wave propagation for detection and sizing of flaws in field pipes with high accuracy and efficiency[J]. Annu Res Rep Cent Res Inst Electr Power Ind, 2005:14-15.

[13] 程载斌, 王志华, 张立军等. 管道超声纵向导波裂纹检测数值模拟[J]. 应用力学学报, 2004, 21(4): 76-79.

[14] 李树榜, 李书光, 刘学锋. 板中垂直于表面裂纹超声检测的有限元模拟[J]. 无损探伤, 2006, 30(2): 14-17.

[15] 李邓化, 居伟骏, 贾美娟等. 新型压电复合换能器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[16] G.U.R. Yago, M.E.F. Francisco. Piezoelectric modeling using a time domain finite element program[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007(27): 4153-4157.

[17] 莫喜平. 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):1279-1289.

[18] F. Moser, L.J. Jacobs, Application of finite element methods to study transient wave propagation in elastic wave-guides [J], Review of Progress in Quantitative. NDE, 1998,(17):161-167.

[19] ANSYS公司. ANSYS动力学分析指南[M]. 北京: 美国ANSYS公司北京办事处, 2000.

[20] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.

[21] N.J. Carino. The Impact-echo Method: An Overview[C]. Washington, D.C: May 21-23, 2001.

which will reduce sensitivity and resolution of an ultrasonic inspection system. The study is performed in this paper to reduce these reflection differences with the usual way. With a finite element modeling program ANSYS, several transducer configurations with different damping structure parameters and acoustic impedances are simulated. From the simulation, the wave field and electric field snapshots and voltage response waveforms are acquired, which make it possible to pinpoint the causes of reflection. It is found that the proper design can improve the performances of the transducers significantly. The results show that the finite element method is useful to the design analysis and can decrease the development time and cost of the piezoelectric transducers drastically

**Keywords:** piezoelectric transducer; coupling finite element method; optimization; transient response

### 作者简介

何涛焘, 湘潭大学材料与光电物理学院硕士研究生, 主要研究方向: 声波无损检测系统的研发设计。

地址: 湖南省湘潭大学9010信箱 邮编: 411105

E-mail: maotao1120@163.com

龙土国, 湘潭大学材料与光电物理学院教授, 主要研究方向: 无损评价方法、仪器及工程应用。

刘鹏, 湘潭大学材料与光电物理学院硕士研究生, 主要研究方向: 检测用压电换能器的优化设计。

李要, 湘潭大学材料与光电物理学院硕士研究生, 主要研究方向: 检测用传感器与激励器的优化设计。

读者服务卡编号 001

### Finite element analysis of transient receiving performances of PZT transducers

HE Tao-tao, LONG Shi-guo, LIU Peng, LI Yao

(Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract :** Due to structural parameters and acoustic impedance differences of piezoelectric transducers, unwanted reflection and wave conversion of the receiving signals occur,