

# 厚度振动模式下背衬结构 PZT 的声能特性

谭斌<sup>1</sup> 陈雨<sup>1</sup> 李鹏程<sup>1</sup> 黄润<sup>2</sup> 陈浩<sup>1</sup>

(四川大学 610064 成都)<sup>1</sup> (重庆大学 400044 重庆)<sup>2</sup>

**摘要:** 为了充分利用埋入混凝土中压电陶瓷所激励的声能, 采用了一种在压电陶瓷圆片结构的一面设置金属背衬的方法将压电陶瓷两侧的声能集中到一侧, 提高了声指向性和声能。实验表明: 该方法能使同距离下压电陶瓷圆片轴向声能提高 10 倍以上, 并且得到了声能的相对增量随背衬厚度和声激励频率之积变化的特性曲线。声信号的谱分析还表明: 背衬没有改变声信号的主频和主峰区间的频率带宽; 当声激励频率为谐振频率 79kHz 时, 最优背衬厚度为 2.4mm; 当声激励频率  $f$  为 60kHz~100kHz 时, 接收端声能相对较大, 适合用于实际的压电埋入式超声无损检测。

**关键词:** 埋入; 混凝土; 压电; 背衬; 声能

**中图分类号:** O34 **文献标识码:** A

## 1 引 言

目前超声检测是对混凝土质量状况和缺陷进行检测的主要方法<sup>[1-2]</sup>。文献[3]~[4]对埋入混凝土中压电陶瓷的特性进行了分析, 提出通过埋入的压电陶瓷激励声信号检测混凝土内部缺陷的方法, 克服了传统的超声无损检测难以实现对混凝土结构的实时在线监测的缺点。在这种方法中, 埋入混凝土的压电陶瓷圆片在厚度方向上产生的振动辐射声波被置于圆片轴向垂直混凝土表面的压电换能器接收, 通过分析接收端的声信号判断混凝土内部的健康状态。压电陶瓷埋入混凝土后, 由于混凝土的凝固和收缩而引起的非均匀体积变动会对压电陶瓷的电-声特性产生影响, 使得压电陶瓷声激励效率降低, 并且声波在混凝土结构中的传输过程衰减增大。此外, 在激励、传输、检测过程中还容易受到换能

器脉动噪声的干扰而导致采集到的声信号微弱。这些因素会对数据分析以及检测结果的准确性产生影响, 因此提高声激励效率和声信号的信噪比成为首要任务<sup>[5-6]</sup>。

基于背衬结构的材料在声学领域内已有一些应用。文献[7]提出了一种在水下结构表面敷设背衬材料增强吸声功能的方法, 论述了在不同背衬条件下吸声系数随频率和背衬厚度的变化关系; 文献[8]分析了背衬结构的几何参数、材料参数对压电直探头瞬态接收性能的影响, 并提出通过合理选择背衬结构与材料参数来消减接收信号的多次反射以提高换能器接收性的方法; 文献[9]提出了一种制作高阻抗背衬材料的新方法来提高超声探头的声学衰减性能, 以吸收压电陶瓷片背向发射的声波。本文基于声波在双层介质分界面中的传播特性给出声指向性的定义; 提出了一种在压电陶瓷圆片的一侧用硅橡胶层合金金属背衬来提高声指向性的方法, 达到了充

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808186); 重庆市自然科学基金项目 (CSTC, 08BB0155)

来稿日期: 2011-05-20

修回日期: 2011-12-14

第一作者简介: 谭斌, 男, 1988 年生, 四川大学电子信息学院, 硕士研究生; 研究方向——信号与信息处理、结构健康监测。

通讯作者: 陈雨, E-mail: ychen@scu.edu.cn

分利用声能提高声激励效率的目的; 设计出一种埋入混凝土中的压电陶瓷背衬结构, 并通过实验加以验证。

## 2 背衬对压电陶瓷声能特性的影响

### 2.1 声波在界面上的传播特性与声指向性函数

压电陶瓷与金属背衬层合后成为一种双层介质, 声波在这种层介质中传播表现出与在均匀介质中传播的不同特性, 如图 1 所示。

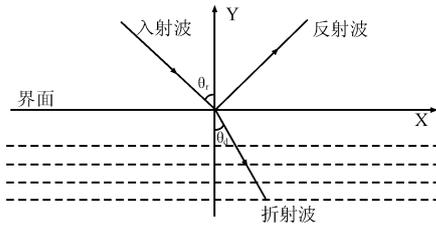


图 1 声波在界面上的反射和透射

当声波在声阻抗为  $Z_1$  的均匀介质中传播遇到声阻抗为  $Z_2$  的介质时, 会在两介质的分界面上发生反射和透射。设  $\theta_r$  为入射角、 $\theta_d$  为折射角, 两介质中声压的反射系数  $R$  和透射系数  $D$  分别为

$$R = \frac{Z_2 \cos \theta_r - Z_1 \cos \theta_d}{Z_2 \cos \theta_r + Z_1 \cos \theta_d},$$

$$D = \frac{2Z_2 \cos \theta_r}{Z_2 \cos \theta_r + Z_1 \cos \theta_d} \quad (1)$$

可见声波在两介质的分界面上反射回波的强度取决于界面两侧介质的声阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  和角度  $\theta_r$ 、 $\theta_d$ <sup>[10-11]</sup>。因此, 利用压电陶瓷和金属背衬的分界面上声波的反射可将压电陶瓷圆片厚度模式下双侧的声信号集中到同一侧, 增强压电陶瓷另一侧声波的能量, 如图 2 所示。在层合背衬后, 原来向两侧辐射的声波集中到一侧, 提高了声指向性, 达到了充分利用声能提高声激励效率的目的。声指向性是超声波声场的一个重要特征参量, 描述了声场的几何特性和声场中声能的集中程度。对于发射响应而言, 声指向性函数是描述辐射声场的空间分布函数。引入量纲为一的指向性函数

$$D(\theta, \omega) = \frac{P}{P_0} = \left| \frac{2J_1(kR \sin \theta)}{kR \sin \theta} \right| \quad (2)$$

其中:  $P_0$  为主波束轴心方向上( $\theta=0$ )的声压值;  $J_1$  为第一类贝塞尔函数;  $k$  为波数;  $R$  为声源的有效

半径;  $\theta$  为方位角。

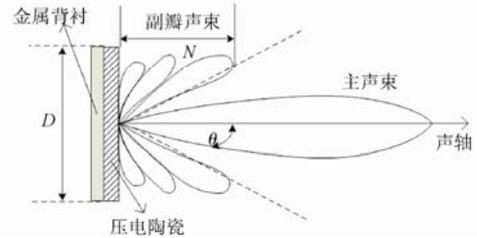
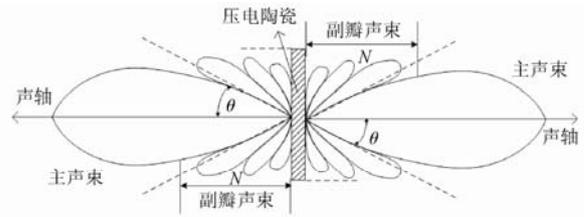


图 2 层合背衬前后压电陶瓷声场声波的分布

### 2.2 试样制备

本文研究压电陶瓷圆片厚度模式下激励声能的变化规律和层合金属背衬的 PZT5H 压电陶瓷埋入混凝土后对接收端声能的影响, 为此制备了三种厚度分别为 1.2mm、2.4mm、3.6mm 的金属背衬。PZT5H 压电陶瓷具有较高的压电常数、弹性系数、介电常数<sup>[12]</sup>, 有利于在埋入条件下辐射更强的声信号。实验用压电陶瓷的参数如表 1 所示。

表 1 PZT5H 压电陶瓷的性能参数

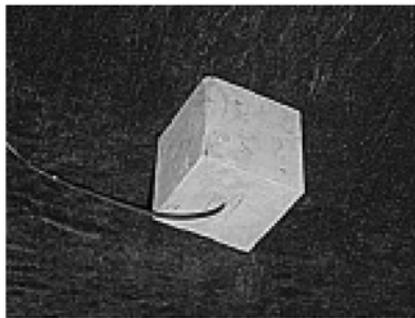
相对介电常数	机电耦合系数	压电常数 d33	密度/ kg·m <sup>-3</sup>	居里温度/ °C
3400	0.66	690	7600	300

压电陶瓷是一种脆性材料, 为了避免埋入混凝土后在混凝土干缩时受到损伤<sup>[13]</sup>, 压电陶瓷和金属背衬的外围均覆盖了一层厚度约为 1.2mm 的硅橡胶(单组分室温硫化硅橡胶)。橡胶层不仅能够保护压电陶瓷, 同时还起到声阻抗匹配的作用<sup>[14]</sup>。压电陶瓷圆片与金属背衬层合后的试样如图 3(a)所示; 埋入压电陶瓷的混凝土模块如图 3(b)所示。实验所用水泥砂浆等级为 M10, 混凝土立方块的边长为 100mm。

实验流程如图 4 所示。压电陶瓷埋入在混凝土立方块的中心位置, 在压电陶瓷上通过同轴电缆接入声激励信号(正弦脉冲电压), 驱动压电陶瓷的两侧辐射声波经混凝土传播后被换能器接收。换能器的性能参数如表 2 所示。



(a) 背衬结构的压电陶瓷



(b) 埋入压电陶瓷的混凝土

图3 试样制备

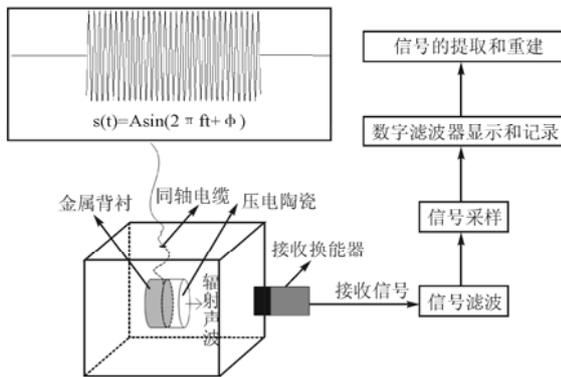


图4 实验流程图

表2 换能器的性能参数

性能参数	参数值
发射系数 $d/\text{pm}\cdot\text{v}^{-1}$	592
接收系数 $g/\text{mV}\cdot\text{m}\cdot\text{m}\cdot\text{N}^{-1}$	20
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7500
波前相速度 $c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4000
声阻抗率 $Z_c/\text{GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	30
介电常数 $\epsilon/\epsilon_0$	3400
机电耦合效率 $KT/\%$	75
机械品质因数 $Q_m$	65

### 2.3 声能实验及分析

埋入混凝土中压电陶瓷圆片在厚度振动模式下声激励频率  $f$  以间隔 2kHz 从 20kHz~500kHz 变化, 产生的声信号通过压电陶瓷圆片轴向方向被放置在混凝土立方体表面的压电换能器接收, 可以得到在不同频率信号下接收端声能的最大值。改变背衬厚度可以得到接收端的声能比值  $\lambda$  (同一频率下接收到的声信号的能量与三种背衬下接收到的声信号能量的最大值之比) 随  $f$  变化的特性曲线如图 5 所示。

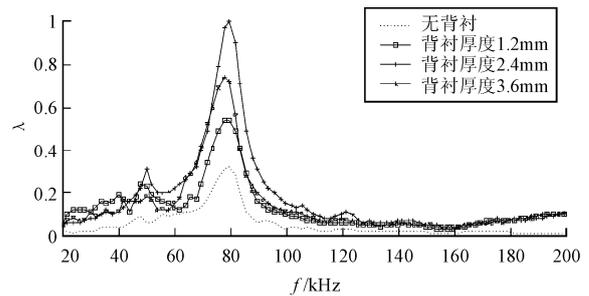


图5 接收声能比值  $\lambda$  的频率特性曲线

从图 5 可以看出: 压电陶瓷的谐振频率 (约为 79kHz) 没有因为埋入混凝土中而发生改变, 即应力的变化不会影响压电陶瓷的谐振频率, 这与文献[15]的结论相同; 相对于无层合背衬的情况, 2 片金属背衬 (背衬厚度约 2.4mm) 使压电陶瓷的声信号幅值增加到原来的约 4 倍。当减小或增加背衬厚度时, 相同激励频率下声信号的幅值反而减小, 说明背衬的最佳厚度与声激励频率相关。

表 3 列出了在不同的  $f$  下金属背衬对声信号声能的大小峰峰值的影响。从表中可以看出: 当  $f$  为压电陶瓷的谐振频率时背衬最优厚度仍约为 2.4mm, 随着  $f$  的减小背衬最优厚度逐渐减小。这是由于背衬与背衬以及背衬与压电陶瓷间使用了声阻抗值较小的橡胶层所致。当  $f$  小于或者大于谐振频率时, 由于激励产生的声波能量下降而背衬对信号的反射作用相对增强, 使得对同一反射率, 所需的背衬厚度减小。

表3 不同层合背衬厚度下声信号的峰值

$f$	无背衬	1.2mm	2.4mm	3.6mm
79kHz	110mv	192mv	282mv	212mv
47.8kHz	18.6mv	60.8mv	62.4mv	39.2mv
33.5kHz	10.8mv	42.8mv	22.8mv	16.4mv

### 3 降噪后声信号功率谱分析

#### 3.1 声信号的降噪

在埋入条件下压电陶瓷的电-声换能性能下降, 其接收到的声信号微弱信噪比降低。为了有效抑制由于接收换能器的振荡和声波在混凝土及换能器内部的多次反射所引起的噪声, 本文设计了一个有限长 FIR 数字滤波器, 其窗函数为

$$\omega(n) = \frac{I_0(\beta)}{I_0(\alpha)}, \quad (0 \leq n \leq N-1) \tag{3}$$

其中

$$\beta = \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}, \quad I_0(\beta) = 1 + \sum_{k=1}^{+\infty} \left[\frac{1}{k!} \left(\frac{\beta}{2}\right)^k\right]^2$$

$\omega(n)$ 为 Kaiserord 窗函数;  $I_0(\beta)$ 为零阶第一类修正贝塞尔函数;  $\alpha$ 为控制窗形状的参量。

FIR 滤波器下限截止频率  $f_{c1}=20\text{kHz}$ ; 上限截止频率  $f_{c2}=125\text{kHz}$ ; 阶数为 45;  $\beta = 3.3953$ 。用该滤波器对声信号滤波后得到如图 6 所示的声信号时域波形; 可以看出经处理后的声信号比较平滑, 信噪比提高<sup>[16]</sup>。

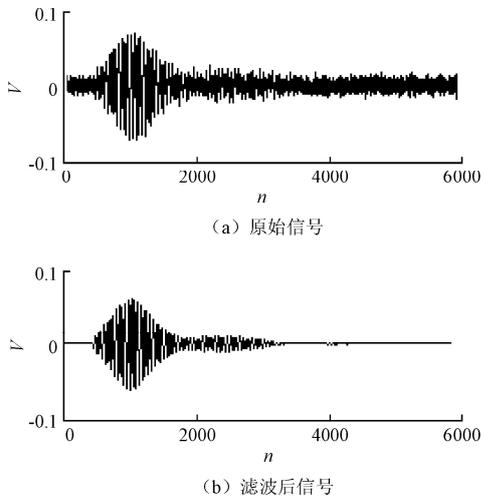


图 6 用 FIR 滤波器去噪前后的声信号的对比

#### 3.2 声能的相对增量和声信号功率谱的分析

从图 5 和表 3 中已知最优背衬厚度与  $f$  相关; 对接收到的声信号进行功率谱分析如图 7 所示。可以根据观察到的埋入混凝土中层合背衬压电陶瓷接收端声能的变化, 得出最优背衬厚度。通过对实验和计算所得数据进行拟合可得声能的相对增量  $\Delta\lambda$  随背衬厚度与声激励频率的乘积  $D=d \cdot f$  的变化特性曲线如图 8 所示。

图 7 表明: 当  $f$  为  $33.5\text{kHz}$ 、 $d$  为  $1.2\text{mm}$  (即  $D=40.2$ ) 时, 声能的相对增量取极大值  $10.43$ 。但此时的声能并不是最大值, 因为  $f$  并不是压电陶瓷的谐振频率。而当  $f$  为压电陶瓷谐振点  $79\text{kHz}$  时, 最优背衬厚度为  $2.4\text{mm}$ , 此时声能的相对增量只有约  $3.3268$ ; 当  $f$  为  $47.8\text{kHz}$ , 背衬为  $2.4\text{mm}$  (即  $D=114.72$ ) 时, 声能的相对增量达到极大值  $8.7367$ , 大于同频率下其它背衬 (即  $D$  分别为  $0$ 、 $57.36$ 、 $172.08$ ) 时声能的相对增量值 ( $0$ 、 $6.9521$ 、 $0.5638$ ); 当  $f$  为  $79\text{kHz}$ , 背衬为  $2.4\text{mm}$  (即  $D=189.6$ ) 时, 声能的相对增量达到极大值  $3.3268$ , 大于同频率下其它背衬 (即  $D$  分别为  $0$ 、 $94.8$ 、 $284.4$ ) 时声能的相对增量的值 ( $0$ 、 $1.0664$ 、 $1.5312$ )。

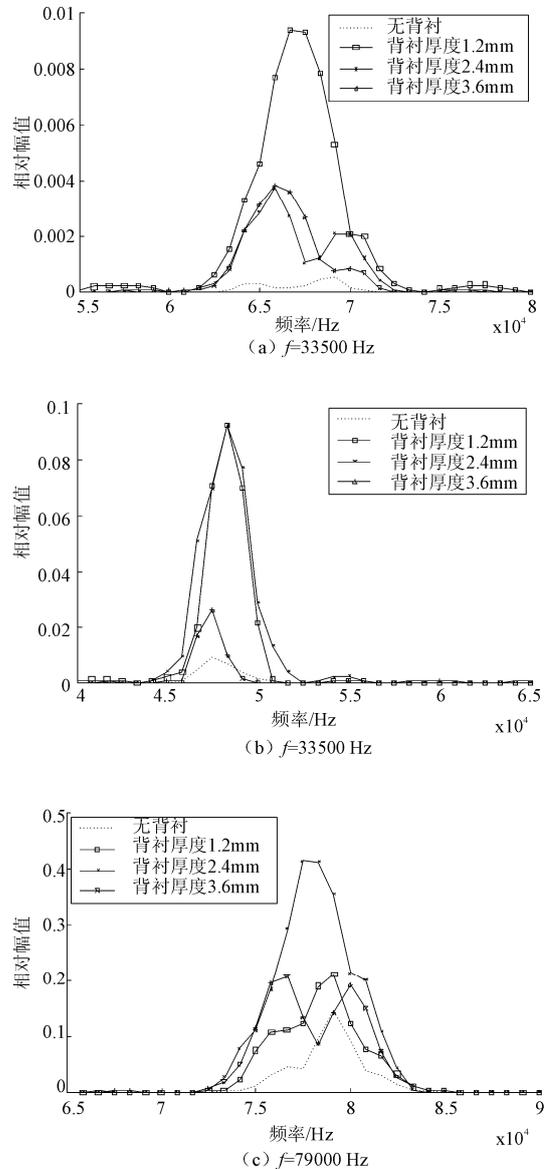


图 7 不同层合厚度背衬声信号功率谱

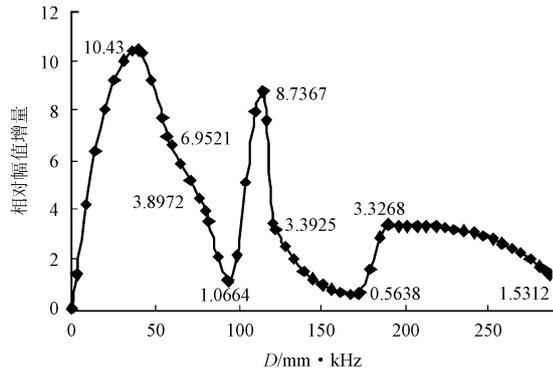


图8 相对幅值增量与 $D$ 变化的特性曲线

图8表明：在埋入条件下，在层合金属背衬后埋入混凝土中的压电陶瓷所激励的声信号指向性增强，使原来向两侧传播的声波由于背衬的反射而在同一侧叠加，从而提高了声激励效率 $f$ ，增大了单侧的声能，并且声能的相对增量 $\Delta\lambda$ （层合背衬前后声能之差与无背衬时声能的比值）与背衬厚度和声激励频率有关。 $D = d \cdot f$ 是影响声能的相对增量的关键因素，且声能与声能相对增量并不成线性关系，声能大其声能相对增量并不一定大。为提高声信号的信噪比应同时考虑 $D$ 对声指向性的影响，选择适当的 $D$ 。实验表明： $f$ 为压电陶瓷的谐振频率为79kHz、背衬厚度 $d$ 为2.4mm时，接收到的声能最大。结合图7可知：接收端声信号的功率谱的主峰中的主频的大小与声能的相对增量的大小均是一致的；背衬并不改变声信号功率谱的主频及主峰区间的频率带宽以及压电陶瓷的谐振频率，即仅仅只提高了声能而没有改变接收端声信号的频率特性。当 $f$ 为60kHz~100kHz时，接收端声能相对较大，适合用于实际的压电埋入式超声无损检测。

## 4 结论

1) 在埋入条件下混凝土的凝固收缩对压电陶瓷的电-声特性产生影响，使得压电陶瓷声激励效率降低且声信号在混凝土传播过程中和接收时容易受到噪声的干扰。金属背衬能将压电陶瓷两侧的声能集中

到一侧从而提高声能利用效率，改善接收端声信号的信噪比。

2) 在压电陶瓷圆片一侧层合的金属背衬不改变声信号功率谱的主频、主峰区间的频率带宽、压电陶瓷的谐振频率，接收端声能的相对增量与背衬厚度和声激励频率相关；声能与声能的相对增量并不成线性关系，应同时考虑背衬厚度 $d$ 和声激励频率 $f$ 对声能的影响选择适当的 $D$ 提高声信号的信噪比。实验表明：当声信号频率 $f$ 为压电陶瓷的谐振频率（79kHz）时，最优背衬厚度约为2.4mm。

## 参 考 文 献

- [1] Glenn Washer, Paul Fuchs. Ultrasonic testing of reactive powder concrete [J]. IEEE Transaction on Ultrasonic Ferro- electrics and Frequency Control, 2004, 51(2): 193-194.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈雨, 文玉梅, 李平, 等. 混凝土中压电陶瓷在变载荷作用下的特性研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(6): 701-702.
- [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): 204-206.
- [6] 朱建林, 礼丹, 柳莎莎, 等. 超声波传感器在混凝土无损检测系统中的应用[J]. 传感技术学报, 2008, 21(7): 128-129.
- [7] 张阿漫, 姚熊亮, 钱德进, 等. 背衬对隔声去偶吸声性能的影响[J]. 传感器与系统, 2008, 27(2): 53-58.
- [8] 何涛焘, 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.
- [9] 吴锦川, 蔡恒辉. 一种制作高阻抗背衬材料的新方法[J]. 声学技术, 2008, 27(2): 214-216.
- [10] 吴慧敏. 结构混凝土现场检测新技术-混凝土非破损检测[M]. 湖南: 湖南大学出版社, 1998: 88-90.
- [11] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册: 超声卷[M]. 北京: 世界

- 图书出版公司北京公司, 1996(1): 75-82.
- [12] 陈雨, 文玉梅, 李平, 等. 压电埋入式混凝土应力及温度传感器[J]. 微纳电子技术, 2007, 7(8): 204-205.
- [13] Chen Yu, Wen Yumei, Li Ping. Characterization of dissipation factor in terms of piezo electric equivalent circuit parameters[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferro- electrics and Frequency Control, 2006, 53(4): 2367-2369.
- [14] Wen Y, Chen Y, Li P. Characterization of PZT ceramic transducer embedded in concrete[J]. Sensors & Actuators: A Physical, 2006, 128(1): 116-124.
- [15] 陈雨. 混凝土压电陶瓷敏感模块特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 74-75.
- [16] 高全西, 丁玉美. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科大出版社, 2009(1): 196-206.