

## Research on the Influence of the Backing to the Electricity-Acoustic Characteristics of the Piezoelectric Ceramic Embedded in Concrete\*

LI Pengcheng, CHEN Yu\*, TAN Bin, CHEN Hao

(Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract:** Conventional ultrasonic pulse method cannot process real-time health monitoring to the concrete quality, instead piezoelectric embedded concrete alert module that embedded the piezoelectric ceramic in concrete, can achieve the on-line monitoring on concrete structures. But because the electric acoustic performance was severely affected after the piezoelectric ceramic embedded in concrete, including weak energy of acoustic signal which can be stimulated, low SNR, it is difficult to apply to the occasions which has strong noise and thick structure to be detected. To solve this problem, methods that combined metal backing upon the piezoelectric ceramic embedded in concrete to improve energy efficiency and sound directivity is proposed. Time domain and frequency domain characteristics of the received signal under the conditions different of backing thickness and different excitation frequency are analyzed. The results show that, after processing of metal backing the energy of ultrasound signal increases 2~6 times, and this method does not affect waveform and frequency components of the ultrasonic signal with high feasibility.

**Key words:** ultrasonic testing; concrete; piezoelectric submerged; metal backing; energy

EEACC:2860;7230

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.01.009

## 背衬对埋入混凝土中压电陶瓷电-声特性的影响\*

李鹏程, 陈雨\*, 谭斌, 陈浩

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 传统超声脉冲法不能对混凝土质量进行实时健康监测, 将压电陶瓷埋入混凝土中构成的压电埋入式混凝土机敏模块能够进行混凝土结构的在线监测, 但由于压电陶瓷在埋入混凝土后其电-声性能受到较大影响, 能够激励的声信号能量弱、信噪比低, 很难应用于噪声干扰强、待检测结构厚的场合。针对这一问题, 提出了通过在埋入混凝土中的压电陶瓷上层合金背衬的方法, 提高声能的利用率和指向性。分析了在不同背衬厚度和不同激励频率条件下接收信号的时、频域特征。结果表明, 经过层合金背衬处理后的超声信号的能量提高了2~6倍, 且这种方法并没有影响超声检测信号的波形及频率成分, 具有较高的可行性。

**关键词:** 超声检测; 混凝土; 压电埋入式; 金属背衬; 能量

中图分类号: O34

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)01-0044-05

混凝土结构内部可能出现的不密实、裂缝及空洞区往往会影响到结构的承载力和耐久性而造成不同程度的事故, 所以需要对混凝土结构进行无损检测以监测其健康状况<sup>[1]</sup>。超声脉冲法具有良好方向性与几何特性, 而且检测灵敏度高, 在工程中得到了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。但是, 这种方法不能对混凝土结构健康状况进行在线监测, 难以承担大型建筑设施

长期安全监测的重任<sup>[5]</sup>。为实现混凝土结构的实时超声无损监测, 王玉梅等提出了一种将压电材料埋入混凝土中以实现混凝土健康状况进行实时监测的方法<sup>[6]</sup>。陈雨等研究了埋入条件下压电元件在应力和温度作用下其耗散因子、损失特性的变化, 制作了压电埋入式混凝土机敏模块<sup>[7-9]</sup>。该模块可以实现对混凝土结构应力和温度的实时监测。但该

方法通过检测埋入混凝土中压电元件的等效参数对应力和温度进行反推, 是一种被动检测, 无法实现对混凝土内部缺陷的主动检测。

压电陶瓷具有逆压电效应, 所以通过激励埋入混凝土中的压电元件产生声波并通过压电换能器接收声信号可以实现对声波传播路径上混凝土内部缺陷的检测。但是, 埋入过程中, 压电陶瓷在混凝土干缩应力的作用下, 其电-声转换性能降低, 使产生的声信号能量减小。声信号还会在混凝土内部传播过程中进一步衰减, 使接受到的声信号信噪比降低, 增加混凝土缺陷检测的误差。文献[10]对埋入条件下的压电陶瓷圆片振动模式进行了仿真研究, 研究表明, 薄圆片压电陶瓷厚度振动模式下声场关于中心圆面对称分布, 而声波则沿轴向相反方向传播。根据埋入混凝土中圆片形压电陶瓷厚度振动模式下声信号关于圆面对称的特性, 本文利用声波的反射和透射特性, 在埋入混凝土中的 PZT 压电陶瓷 (PZT5H 铌镁锆钛酸铅三元系压电陶瓷) 一侧层合一定厚度的金属背衬, 制成了层合金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块。分析了接收信号的能量和时、频域特性。分析结果表明, 特定厚度的背衬能改善电-声特性产生的声信号指向性, 增强接收信号的能量提高其信噪比; 可使接收信号能量增幅最大的背衬最佳厚度同激励的声信号频率有关。

## 1 声压反射率

声波在传播的过程中遇到由声阻抗不同的介质构成的界面时, 会产生反射现象。埋入混凝土中的 PZT 压电陶瓷特性受到混凝土复杂力学环境的影响。实验表明, 压电陶瓷圆片厚度振动模式下产生的声波主要沿轴向往相反方向传播, 在压电陶瓷一侧设计适当的背衬可以将一侧的声波部分反射到另一侧, 从而提高声波指向性, 增加单侧声波的能量。图 1 为埋入混凝土中压电陶瓷背衬对声波反射的示意图, (a) 是层合金属背衬后的压电陶瓷模块示意图, (b) 压电陶瓷单侧声波被背衬反射的示意图 (压电陶瓷同背衬间的间隔被夸大画出)。

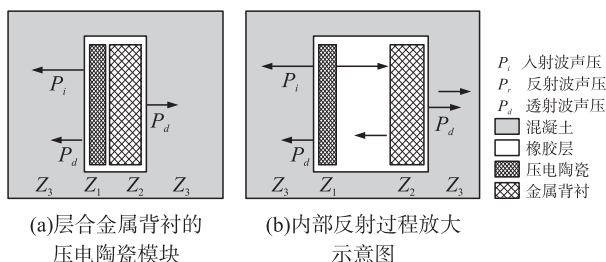


图 1 金属背衬反射声波示意图

根据文献[11]的双界面反射公式以及在第一、三介质中有第二介质层这一情况的反射公式, 考虑到本研究中混凝土、压电陶瓷及金属背衬所形成的多介质单元的具体情况, 得到求解声波反射率的修正式(1)。

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \sqrt{\frac{\left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 - Z_3}\right) \sin^2 2\pi \left(-\frac{d}{\lambda^2}\right)}{1 + \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2 + Z_3}\right) \cos^2 2\pi \left(\frac{d}{\lambda^2}\right)}} \quad (1)$$

其中  $R$  为声压反射率,  $P_i$  为入射波的声压,  $P_r$  为反射波的声压,  $Z_1$  为 PZT 压电陶瓷声阻抗,  $Z_2$  为金属背衬声阻抗,  $Z_3$  为混凝土声阻抗,  $d$  为金属背衬厚度,  $\lambda = c/f$  为声波在金属背衬中的波长,  $c$  为声波在金属背衬中波速,  $f$  为频率。

层合金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块选用的 PZT5H 铌镁锆钛酸铅三元系压电陶瓷声阻抗为  $5.9 \times 10^6 \text{ g}_n / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。水泥砂浆的抗压等级 M10, 声阻抗为  $6.34 \times 10^6 \text{ g}_n / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。金属背衬为直径 2.5 cm, 厚 1.2 mm 的合金金属圆片, 主要成分为铅、铝、镍, 声阻抗为  $4.3 \times 10^6 \text{ g}_n / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 声波在构成金属背衬的金属圆片中的传播速度为 4 500 m/s。为了研究一定频率下不同厚度的金属背衬与声压反射率的关系, 利用式(1)对 PZT5H 压电陶瓷的谐振频率 79 kHz (压电陶瓷的谐振频率不会因为埋入而发生变化<sup>[10]</sup>) 以及非谐振频率 47.8 kHz 进行仿真, 图 2 为根据式(1)得到的不同厚度的金属背衬与声压反射率的关系。当激励频率为 79 kHz 时, 最大反射率对应的背衬厚度为 2.27 mm。当频率为 47.8 kHz 时, 最大反射率对应的背衬厚度为 2.11 mm。

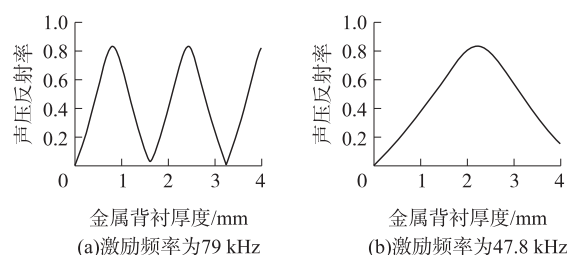


图 2 不同厚度的金属背衬与声压反射率的关系

## 2 压电埋入式混凝土模块设计

使用起声阻抗匹配作用的硅橡胶 (单组份室温硫化硅橡胶) 将一片至数片金属圆片与压电陶瓷层合至一起, 可构成不同厚度的金属背衬。另外, 压电陶瓷本身较脆, 混凝土凝固过程中产生的收缩应力可能导致压电陶瓷片损坏, 所以压电陶瓷外的硅橡胶还起保护、绝缘和防腐的作用<sup>[12]</sup>。图 3 为覆盖橡胶层的 PZT 压电陶瓷及实验中所用到的金属背衬。



图 3 覆盖橡胶层的 PZT 压电陶瓷及金属背衬

实验所用水泥强度等级为 32.5R, 水泥砂浆的抗压等级为 M10, 混凝土抗压模规格为 100 mm×100 mm×100 mm。层合金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块超声无损检测系统的工作示意图及制作好的层合金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块如图 4 所示。由信号发生器发出的频率范围为 20 kHz ~ 250 kHz 的正弦脉冲信号驱动混凝土模块中的压电陶瓷发出超声波<sup>[13]</sup>。超声波通过混凝土后携带了混凝土的信息, 使用 3 号通用锂基脂作为耦合剂, 由外部的接收换能器接收携带混凝土信息的超声信号, 并将信号传入示波器进行分析。

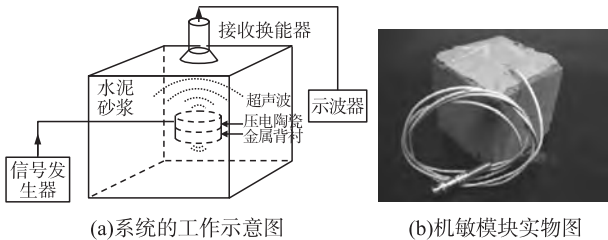


图 4 系统的工作示意图及实物图

文献[10]对埋入状态下的压电陶瓷谐振频率的研究表明: 压电陶瓷在埋入状态下谐振频率不发生改变。所以选取 PZT5H 的谐振频率 79 kHz 以及以另一可使压电陶瓷产生较大能量的参考频率作为激励频率。通过信号发生器扫频得到参考频率的值为 47.8 kHz。所以, 对层合金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块的研究主要围绕这两个频率点进行。图 5 为扫频后各频率点对应的峰峰值曲线图。

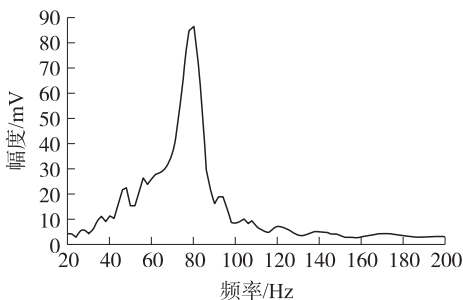


图 5 各频率对应峰峰值曲线

为研究不同厚度金属背衬在不同频率的激励信号下的声指向性, 针对两种激励频率下的最优厚度, 分别设计了 0 ~ 3 块金属圆片作为金属背衬的四组 PZT 压电陶瓷模块, 其中 1 块及 3 块金属背衬为对应最优厚度 2 块金属背衬的对照组。其剖面图如图 6(a) ~ 6(d) 所示。

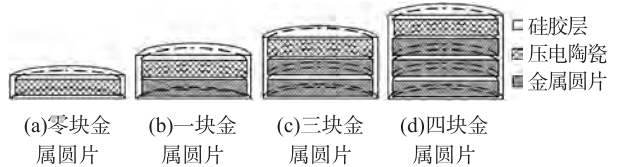


图 6 层合金属背衬的 PZT 压电陶瓷模块剖面图

由于埋入混凝土中的压电陶瓷模块为图 6 所示的复合结构, 不能确定该复合结构是否会影响压电陶瓷的谐振频率, 所以对层合不同厚度金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块进行扫频, 得到不同背衬厚度条件下各频率对应峰峰值曲线如图 7 所示。

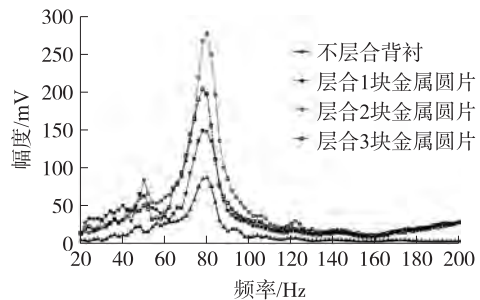


图 7 不同背衬厚度条件下各频率对应峰峰值曲线

由图 7 可以看出, 层合不同厚度的金属背衬并没有改变压电陶瓷的谐振频率, 各压电陶瓷模块的峰峰值在参考频率点处均取得了较大的值, 所以层合背衬后并没有改变压电陶瓷的频率特性, 可以对压电埋入式混凝土机敏模块在谐振频率点 79 kHz 和参考频率点 47.8 kHz 处进行分析研究。

### 3 信号时域图及幅度谱分析

分别对 28 d 的层合四种不同厚度金属背衬的水泥砂浆试模在 79 kHz、48 kHz 两种激励频率下进行实验, 并利用信号时域图及幅度谱对实验数据进行信号能量、波形及频率成分三方面进行分析, 以确定在压电埋入式混凝土机敏模块中层合金属背衬对检测信号能量及频率等参数的影响。图 8、图 9 为不同金属背衬厚度的机敏模块分别在激励频率为 79 kHz、47.8 kHz 条件下的超声无损检测接收信号的归一化信号时域图及幅度谱, 其中用于频谱分析的数据长度为 6 000 点, 采样频率为 5 MHz。

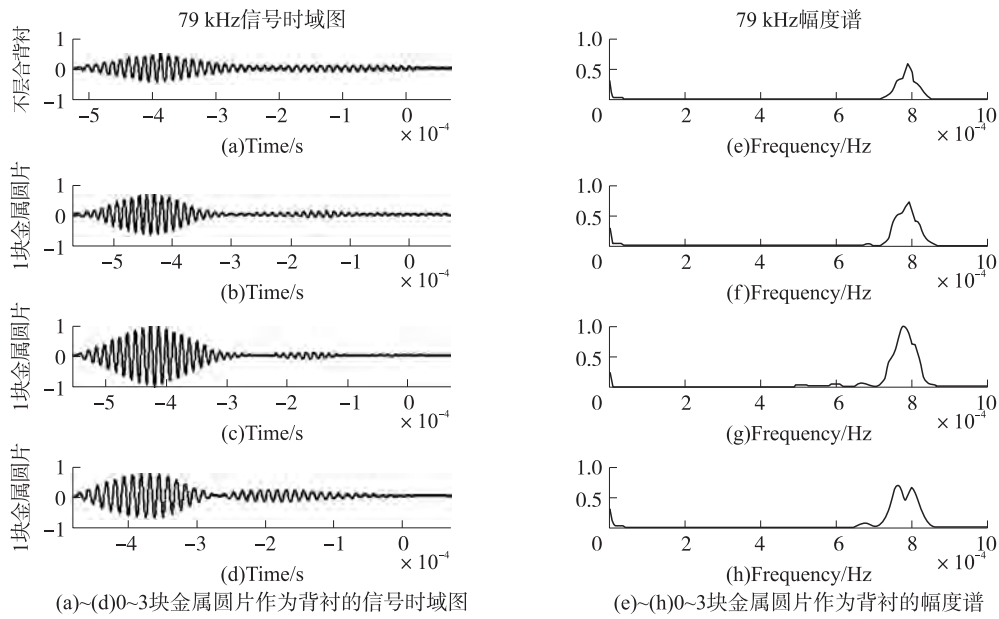


图 8 频率为 79 kHz 的接收信号时域图及幅度谱

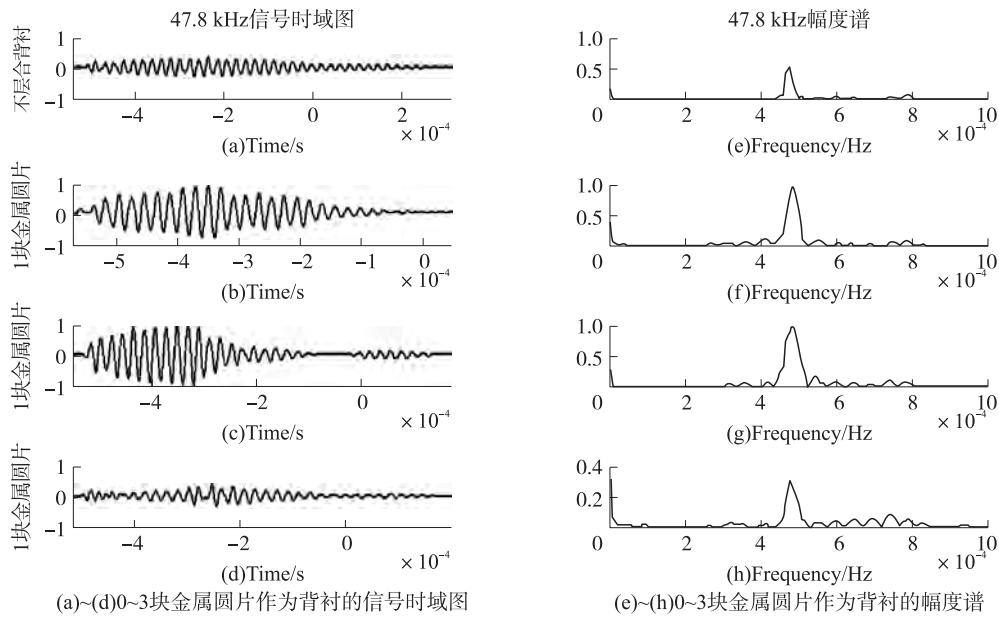


图 9 频率为 47.8 kHz 的接收信号时域图及幅度谱

从图 8、图 9 中的 (a) ~ (d) 可以看出:对于相同的激励频率,各混凝土模块的无金属背衬一侧对应的接收信号的波形未发生畸变、幅度值明显提升。对 (e) ~ (h) 进行对比可以看出,不层合背衬时,无金属背衬一侧接收到的超声信号的频率的主要成分分布在激励频率附近一定范围内,而加入背衬之后的频率成分并没有发生改变,主频仍然在 79 kHz 和 47.8 kHz 处。这说明层合背衬模块的接收信号频率范围与无背衬模块的范围相同,主频未发生频率漂移。为确定能量的具体变化情况,理论计算得到的反射率与实验得到的接收信号的峰峰值和总能量值如下表 1 所示。

表 1 不同频率、不同背衬厚度条件下的接收信号幅度峰峰值及总能量值与理论反射率的关系表

	79 kHz			47.8 kHz		
	峰峰值/mV	能量/J	理论反射率	峰峰值/mV	能量/J	理论反射率
无背衬	110	1.1525	0%	18.6	0.1176	0%
1 块金属圆片	192	2.3442	43%	60.8	0.5981	47%
2 块金属圆片	282	4.9493	83%	62.4	0.7322	81%
3 块金属圆片	154	1.8826	34%	39.2	0.0752	33%

由表1可以看出,在这三种频率下,背衬对压电埋入式混凝土模块的无金属背衬一侧的超声无损检测接收信号能量起到了明显的增幅作用,不同的背衬厚度对应的增幅效果有所差别。当激励频率为79 kHz时,层合2块金属圆片的接收信号能量最大,相对于无金属背衬模块的信号增幅为4.39倍,而理论计算得到的反射率也为最大,为83%;当激励频率为47.8 kHz时,层合2块金属圆片的接收信号能量仍然最大,能量最大增幅6.22倍,理论计算得到的反射率为81%,但是能量增幅以及理论反射率均与层合1块金属背衬时的情况更为接近。

经过以上分析可知:①层合金属背衬后,压电埋入式混凝土机敏模块无金属背衬一侧的声指向性明显得到改善,能量得到提升。②由表1看出,声压反射率越大,单侧能量增幅越大,反之亦然。说明声压反射率与单侧能量增幅呈非线性的正比关系。③对于79 kHz和47.8 kHz这两种频率,最优金属背衬厚度在1片到2片金属圆片之间。由对实验数据的分析可看出,随着激励频率的降低,最优背衬厚度将逐渐减小,这与理论计算所得数据相似。④两种激励频率得到的能量增幅倍数并不相同,79 kHz时的增幅倍数较小,47.8 kHz时的增幅倍数较大。由此可知,背衬对小信号的能量增幅作用更为明显。由于混凝土内部的微界面的存在使得传播的声波发生漫反射现象,导致激励频率高时探伤的灵敏度高,但是传播距离短,频率低时恰恰相反,所以背衬对小信号提高检测灵敏度有着重要意义。

## 4 结论

本文提出了一种通过层合金属背衬来增强压电埋入式混凝土机敏模块的超声无损检测信号声指向性的方法。通过对实验数据的分析表明:不同频率下,层合金属背衬的混凝土机敏模块无金属背衬一侧的接收信号能量提升了2~6倍,且波形没有出现

畸变,主频未出现漂移。因为背衬对较小的接收信号可以起到很好的改善效果,而且背衬体积小,不会影响混凝土结构的承载力及耐久性,取材容易且造价低廉,所以很容易针对实际情况选择合适的频率和背衬,将层合金属背衬的压电埋入式混凝土机敏模块大量应用在路桥、大坝等信噪比低,待测构件厚且需要长期进行健康监测的大型混凝土结构当中,具有很高的实用性。

## 参考文献:

- [1] 沈新普,鲍文博,沈国晓. 混凝土断裂与损伤[M]. 冶金工业出版社,2004.
- [2] 朱建林,向礼丹,柳莎莎. 超声波传感器在混凝土无损检测系统中的应用研究[J]. 传感技术学报,2008,21(7):1290-1294.
- [3] 沈建中,李宗津,张之勇. 土木工程中的无损检测技术及其应用[J]. 无损检测,2000,22(11):497-500.
- [4] 李为杜. 混凝土无损检测技术[M]. 同济大学出版社,1989:9.
- [5] Lai Z H, Huang J K, Mei C. Shape and Placement of Piezoelectric Sensors for Panel Flutter Limit Cycle Suppression [J]. AIAA, 1996,34(4):136-140.
- [6] Wen Y, Li P, Huang S. Study on the Readout of Piezoelectric Distributed Sensing Network Embedded in Concrete [J]. SPIE, 1998,330:642-671.
- [7] 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(4):151-154.
- [8] 陈雨,文玉梅,李平. 压电材料中的耗散因子及其随应力的变化[C]//中国科协第二届优秀博士生学术年会论文集. 中国科学技术出版社,2004.
- [9] 陈雨,文玉梅,李平. 利用埋入式压电陶瓷进行混凝土结构应力监测的实验研究[R]. 第九届全国敏感元件与传感器学术会议西安. 国防工业出版社,2005.
- [10] 安占营,陈雨. 基于压电埋入式模块的混凝土声检测研究[D]. 重庆大学硕士学位论文,2010.4.
- [11] 超声波探伤编写组. 超声波探伤[M]. 电力工业出版社,1980.
- [12] 田卉,文玉梅,李平. 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):1977-1982.
- [13] 陕西省建筑科学研究设计院. 上海同济大学. 超声法检测混凝土缺陷技术规程[S]. 北京,2000.



李鹏程(1985-),男,内蒙古呼和浩特人,四川大学硕士研究生。主要研究方向为:结构健康监测、信号与信息处理、DSP结构设计,tapuriss8584@163.com;



陈雨(1976-),男,1999年获重庆大学动力工程学院电厂专业学士学位,2002年获重庆大学动力工程学院动力机械及系统专业硕士学位,2006年获重庆大学光电工程学院仪器科学与技术专业博士学位,四川大学副教授。主要研究方向为:结构健康监测、混凝土压电机敏结构、压电传感器,ychen@scu.edu.cn。