

# 基于加权欧氏距离的陶瓷器超声波辨识方法

安笑笑, 贺西平, 卢 康

(陕西师范大学物理学与信息技术学院陕西省超声重点实验室, 陕西西安 710119)

**摘 要:** 为克服陶瓷器鉴定传统方法的局限性, 提出一种基于加权欧氏距离的陶瓷器超声波辨识方法. 以三个完全相同的方形陶瓷盒子作为实验样品, 根据样品的断面扫描电镜照片, 分析超声波波长与其内部颗粒尺寸之间的关系; 提取 10MHz 超声波在样品内部的背向散射信号, 计算各样品与标准样品的背向散射信号间的加权欧式距离, 与事先留存的标准样品自身的加权欧氏距离进行比较. 计算结果表明, 不同样品之间的加权欧式距离不同. 利用背向散射信号的加权欧氏距离, 可以快速、准确地辨识陶瓷器样品.

**关键词:** 超声波; 颗粒尺寸; 背向散射信号; 加权欧式距离

**中图分类号:** O426.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2018)07-1737-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.028

## Identification of Ceramic Using Ultrasonic Pulses Based on the Weighted Euclidean Distance

AN Xiao-xiao, HE Xi-ping, LU Kang

(Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonic, School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

**Abstract:** In order to overcome the limitation of the traditional method of ceramic identification, an ultrasonic identification method based on the weighted Euclidean distance is proposed. Three ceramic boxes with the same outline dimensions as experimental samples, the relationships between ultrasonic wave length and the particle size of ceramic are analyzed according to cross-section SEM photographs of the ceramic, the weighted Euclidean distances between standard sample and other samples are calculated by extracting 10MHz ultrasonic backscattering signals, and compared to the self-weighted Euclidean distance of the standard sample. The calculated results show that the weighted Euclidean distance between different samples is different. Using the weighted Euclidean distance of the backscatter signal, the ceramic sample can be identified quickly and accurately.

**Key words:** ultrasonic; particle size; backscattering signal; weighted Euclidean distance

### 1 引言

近年来,随着科技的不断进步,作伪陶瓷器日益增多,且作伪技术“日益精湛”<sup>[1]</sup>.许多作伪陶瓷器已很难通过传统方法来鉴定,比如依据个人所积累的经验,利用眼看、手摸、耳听、鼻闻等对器物进行鉴别<sup>[2]</sup>.显然,传统的鉴别方式存在较大的局限性,其鉴定结果也会导致一定的争议.因此,关于如何对陶瓷做出鉴定的问题,一直受到业内学者们的关注.

对于陶瓷器的鉴定方法,已有许多相关报道.如:X射线衍射法、化学元素标记法、X-CT影像重建等,这些方法使射线透射过被检测物在感光胶片上成像,根据

清洗后胶片的感光情况判断被检测物的内部质量,从而做出鉴别.但这些方法存在以下两个缺点,一是射线对人体健康存在影响,长此以往将对人体造成伤害,二是对一些敏感物有不良作用,对环境有辐射污染<sup>[3-6]</sup>.

通过研究,本文提出采用超声波检测技术来辨识陶瓷器的方法.该方法克服了传统方法的局限性,也不会对人体、环境有副作用,且只需使超声波发射探头从某一面接触被检测物体即可,操作简单、安全,设备轻便,除此之外,该技术还具有成本低,穿透能力强,定向性好,灵敏度高等优点<sup>[7]</sup>.超声波在材料中传播,因材料而异,产生的散射信号与其内部结构密切相关<sup>[8-10]</sup>.利用该特性,文献[11]通过超声波散射信号对金属进

行了辨识.

基于此,本文提取 10MHz 的超声波在三个外观完全相同且同批次的陶瓷盒子内部的散射信号,计算各信号间的加权欧氏距离来辨识陶瓷样品.

## 2 加权欧氏距离计算

在多维数据空间结构中,欧氏距离是测量两个向量空间距离的一种方法<sup>[12]</sup>. 欧氏距离的大小,反应两个向量之间的相似程度,即数值越小,两个向量间的差异越小<sup>[13,14]</sup>. 传统欧氏距离计算表达式为

$$\text{dist}(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2}$$

由上式可知,传统欧氏距离表征两个空间向量之间的累积差异,忽略了向量中对应单个元素之间差异的影响,用上式计算的欧氏距离,不能准确的反映两个向量之间的相似度.

在计算两个向量相似度时,除考虑两个空间向量之间的累积差异,还要充分考虑对应元素间的相似性,对应元素的值越相近,其对相似度的贡献越大,在最终的相似度结果中也会占有更大的权值. 因此,利用加权欧氏距离计算两个向量的相似度会更准确,更有效. 其表达式如下

$$\text{dist}(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{\omega_i}{W} (x_i - y_i)^2}$$

式中,  $\omega_i$  为权值,  $\omega_i = e^{-|x_i - y_i|/\sigma}$ ,  $W$  为归一化因子,  $W = \sum \omega_i$ ;  $\sigma$  为调节因子,实验中取  $\sigma = 1$ . 加权欧氏距离相比于传统欧氏距离在计算两个向量相似度时更能体现出各元素间差异的重要性.

## 3 实验装置及信号采集

实验样品如图 1 所示,是 2015 年于德化县同一批次生产的三个规格大小完全一致的方形陶瓷盒子,边长 57mm,高 46mm,厚 5mm. 因是同一批产品,单从外形上不可能区分. 实验时每次采样的采样点为陶瓷盒子上的相同位置.



图1 实验样品

实验装置如图 2 所示. Panametrics-NDT5077PR 超声脉冲发射/接收仪发射出脉冲重复频率 (PRF) 为

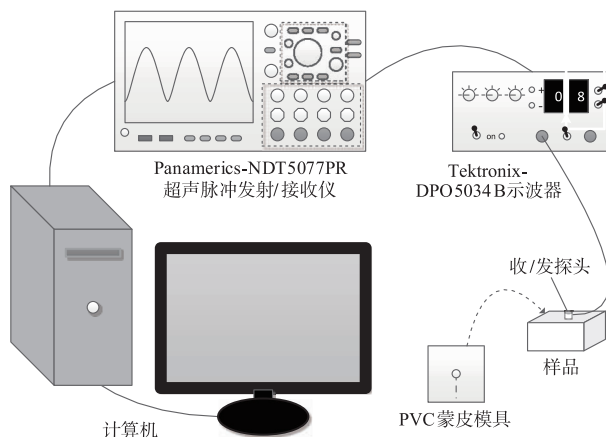


图2 实验装置示意图

100Hz 的脉冲,通过中心频率为 10MHz,晶片直径为 10mm 的超声波收/发探头,入射到实验样品中并产生回波,同时被收/发探头接收. 型号为 Tektronix-DPO5034B 的示波器与超声脉冲发射/接收仪相连接,对探头接收到的时域信号进行采样,采样速率为 500MS/s. 探头与材料之间的耦合剂为水. 为降低电子仪器产生的随机噪声,提高信噪比,把示波器采样 2000 次的信号进行平均,将平均值送入计算机,利用事先编好的程序进行处理分析.

实验时,为保证每次采样点在同一位置,采用与我们提出的固定探头相似的方法<sup>[15]</sup>,用 PVC 软板做一蒙皮模具,其形状大小与样品底面相同,中间开一个与探头大小相同圆孔,将探头装入该孔. 该模具沿探头圆孔到某一边线方向有一缝隙,以便每次测试时将固定好探头的模具撤掉,以保证每次采样的位置相同.

采集到的时域波形如图 3 所示,位于始波和其他各回波之间的信号为背向散射信号,这些散射信号携带有该材料内部组织信息,本文取始波与一次回波之间的背向散射信号为研究对象,来辨识三个陶瓷样品.

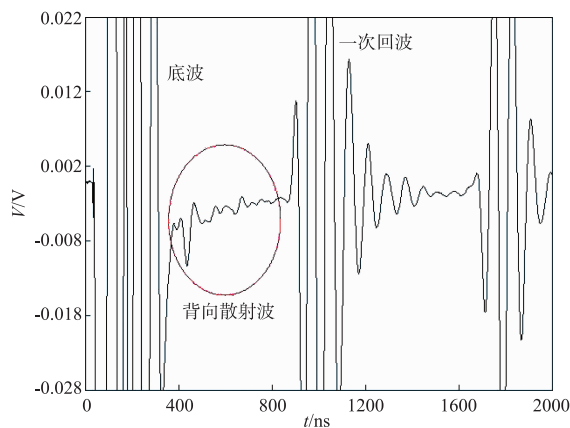


图3 回波信号

## 4 陶瓷器的辨识及结果分析

### 4.1 陶瓷器的显微结构

图4中的(a),(b),(c)分别是实验所用三个陶瓷样品的断面SEM形貌.从图4可以看出陶瓷器内部颗粒大小不同(根据扫描电镜测试的结果,实验所用的陶瓷器颗粒度大小在 $0.05\mu\text{m} \sim 0.3\mu\text{m}$ 范围内),排列杂乱无章,且颗粒之间的分界限不明显.扫描电镜照片还显示,同一陶瓷样品不同部位的内部结构也有很大差异.

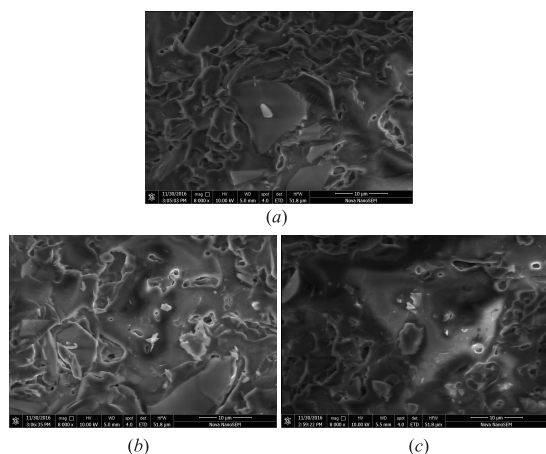


图4 陶瓷器的断面SEM照片

超声波与陶瓷之间的作用与超声波的波长及陶瓷内部颗粒尺寸密切相关<sup>[17,18]</sup>.超声波在陶瓷器中的衰减系数 $\alpha = \alpha_a + \alpha_s$ 由两部分组成:吸收衰减系数 $\alpha_a$ 和散射衰减系数 $\alpha_s$ . $\alpha_a$ 与陶瓷的颗粒尺寸无关;根据陶瓷的颗粒尺寸 $r$ 与超声波波长 $\lambda$ 之间的关系, $\alpha_s$ 与陶瓷的颗粒尺寸 $r$ 和超声波频率 $f$ 满足不同的散射机理:当 $\pi r \leq \lambda$ 时,属于瑞利散射, $\alpha_s = C_1 F r^3 f^4$ ;当 $\pi r \approx \lambda$ 时,属于随机散射, $\alpha_s = C_2 F r f^2$ ;当 $\pi r \geq \lambda$ 时,属于扩散散射, $\alpha_s = C_3 F/r$ .式中 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为常数, $F$ 为各向异性因数<sup>[18]</sup>.实验中所用的10MHz超声波在陶瓷样品内部的波长 $\lambda$ 约为0.6mm,陶瓷器的内部颗粒尺寸 $r$ 小于超声波波长 $\lambda$ ,超声波入射到其内部,会在陶瓷颗粒边界产生瑞利散射.由于陶瓷器内部结构不规则,不同陶瓷器的相同部位对入射超声波形成的散射波不同,收发探头接收到的散射信号的特征也不同,这也是我们用于辨识样品的依据所在.采样后,利用预留的样品信号,求取各样品与标准样品之间的加权欧氏距离,并一一与标准样品自身的加权欧氏距离进行比对,进而对陶瓷器进行辨识.

### 4.2 辨识方法

辨识流程如图5所示.具体辨识流程如下:

首先,选取三个样品中的任意一个作为标准样品,

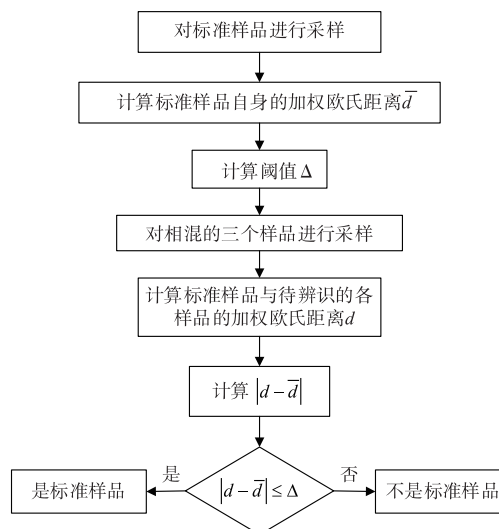


图5 辨识流程图

对其进行7次采样,截取所采信号的始波与一次回波之间的背向散射信号为研究对象,选取其中一个背向散射信号记为 $X$ 向量,其他各背向散射信号分别记为 $Y_j$ 向量, $j$ 表示第 $j$ 个信号,求取 $X$ 与 $Y_j$ 的加权欧氏距离 $\text{dist}(X, Y_j)$ ,将这组加权欧氏距离中的最大值记为 $d_{\max}$ ,最小值记为 $d_{\min}$ ,均值记为 $\bar{d}$ ,并将均值 $\bar{d}$ 作为标准样品自身的加权欧氏距离,阈值定义为 $\Delta = d_{\max} - d_{\min}$ .然后,将三个样品混合后,分别在相同位置对相混的三个样品采样,将各样品的背向散射信号记为 $Y_{mn}$ , $m$ 表示 $m$ 号样品, $n$ 表示第 $n$ 个信号,计算各样品的信号 $Y_{mn}$ 与标准样品的信号 $X$ 之间的加权欧氏距离 $d$ .

最后,将各样品与标准样品之间的加权欧氏距离 $d$ 和标准样品自身的加权欧氏距离 $\bar{d}$ 的差值的绝对值 $|d - \bar{d}|$ 与阈值 $\Delta$ 进行比较,如果 $|d - \bar{d}| \leq \Delta$ ,则该样品是标准样品,反之,若 $|d - \bar{d}| > \Delta$ ,则该样品不是标准样品.

### 4.3 陶瓷器的辨识

按照4.2所述步骤,在标准样品上取三个采样点 $A, B, C$ 分别进行七次采样,计算标准样品在各采样点处的自身加权欧氏距离 $\bar{d}$ 以及阈值 $\Delta$ ,如表1所示.标准样品在采样点 $A$ 处 $\bar{d} = 0.7907$ , $\Delta = 0.2577$ ;在采样点 $B$ 处 $\bar{d} = 0.6864$ , $\Delta = 0.0962$ ;在采样点 $C$ 处 $\bar{d} = 0.7487$ , $\Delta = 0.1619$ .

对混合的三个样品编号1#,2#,3#.为避免一次实验的偶然性,分别对三个样品在 $A, B, C$ 三个采样点各进行六次采样,并计算出各采样点处的标准样品与每个样品的六个加权欧氏距离,将六个值的均值作为每个样品与标准样品的加权欧氏距离 $d$ ,计算结果如表2所示.1#,2#,3#三个样品与标准样品在采样点 $A$ 处的加权欧氏距离 $d(\times 10^{-4})$ 分别为0.7626, 12.1272和

23.8555; 采样点  $B$  处分别为 0.7273, 8.6119 和 16.6832; 采样点  $C$  处分别为 0.8285, 5.9417 和 14.8628.

辨识结果如表 3 所示. 在  $A$  采样点处, 1#样品与标准样品的加权欧式距离  $d(\times 10^{-4})$  与标准样品自身加权欧氏距离  $\bar{d}(\times 10^{-4})$  的差值的绝对值  $|d - \bar{d}| = 0.0281$ , 小于阈值  $\Delta = 0.2577$ ; 在  $B$  采样点处,  $|d - \bar{d}| =$

0.0409, 小于阈值  $\Delta = 0.0962$ ; 在  $C$  采样点处,  $|d - \bar{d}| = 0.0798$ , 小于阈值  $\Delta = 0.1619$ ,  $A, B, C$  三个采样点的计算结果都表明 1#样品是标准样品; 而 2#样品、3#样品在  $A, B, C$  三个采样点处, 与标准样品的加权欧式距离  $d(\times 10^{-4})$  和标准样品自身加权欧氏距离  $\bar{d}(\times 10^{-4})$  的差的绝对值  $|d - \bar{d}|$  均大于阈值, 即 2#样品和 3#样品不是标准样品.

表 1 标准样品自身的加权欧氏距离

采样点	加权欧氏距离 $d(\times 10^{-4})$						$\bar{d}(\times 10^{-4})$	$\Delta(\times 10^{-4})$
$A$	0.8677	0.6211	0.6631	0.8712	0.8426	0.8788	0.7907	0.2577
$B$	0.6627	0.7087	0.6319	0.7046	0.7281	0.6826	0.6864	0.0962
$C$	0.8435	0.7318	0.8284	0.6816	0.6693	0.7374	0.7487	0.1619

表 2 标准样品与每个样品的加权欧式距离

采样点	样品间关系	加权欧式距离 $d(\times 10^{-4})$						均值 $d(\times 10^{-4})$
$A$	1#样品与标准样品	0.7539	0.7367	0.8565	0.6862	0.7260	0.8166	0.7626
	2#样品与标准样品	12.2547	12.1225	12.18	12.1622	11.9957	12.0479	12.1272
	3#样品与标准样品	24.0587	23.8609	23.7859	23.7042	23.7926	23.9308	23.8555
$B$	1#样品与标准样品	0.7728	0.7683	0.7086	0.7160	0.7161	0.6817	0.7273
	2#样品与标准样品	8.8161	8.5387	8.5231	8.5259	8.8378	8.4298	8.6119
	3#样品与标准样品	16.8829	16.6736	16.5708	16.6553	16.6933	16.6232	16.6832
$C$	1#样品与标准样品	0.8405	0.8727	0.7607	0.8728	0.8922	0.7320	0.8285
	2#样品与标准样品	6.0106	5.8877	5.9717	5.8903	5.9215	5.9685	5.9417
	3#样品与标准样品	14.8616	14.8837	14.8956	14.7272	14.9226	14.8858	14.8628

表 3 辨识结果

采样点	标准样品 $\bar{d}(\times 10^{-4})$	编号	$d(\times 10^{-4})$	$ d - \bar{d} (\times 10^{-4})$	与阈值 $\Delta(\times 10^{-4})$ 比较	辨识结果
$A$	0.7907	1#样品	0.7626	0.0281	$< 0.2577$	是标准样品
		2#样品	12.1272	11.3365	$> 0.2577$	非标准样品
		3#样品	23.8555	23.0648	$> 0.2577$	非标准样品
$B$	0.6864	1#样品	0.7273	0.0409	$< 0.0962$	是标准样品
		2#样品	8.6119	7.9255	$> 0.0962$	非标准样品
		3#样品	16.6832	15.9968	$> 0.0962$	非标准样品
$C$	0.7487	1#样品	0.8285	0.0798	$< 0.1619$	是标准样品
		2#样品	5.9417	5.193	$> 0.1619$	非标准样品
		3#样品	14.8628	14.1141	$> 0.1619$	非标准样品

由表 3 可知, 利用陶瓷器样品上任意一个采样点处的背向散射信号间的加权欧式距离都可以快速、准确辨别这三个陶瓷盒子.

## 5 结论

本文以同一批次生产的三个规格大小完全一致的方形陶瓷盒子为试验样品, 在样品上任意选取三个采样点, 分别提取了 10MHz 超声波在样品内部一定深度处的背向散射信号, 计算了各样品的背向散射信号与标准样品在相同位置采样点处的背向散射信号之间的加权欧式距离, 并与标准样品自身的加权欧氏距离进行比较, 从而辨识了三个样品.

陶瓷样品的断面 SEM 形貌图显示陶瓷器内部结构不规则, 颗粒大小不同, 排列杂乱无章, 且颗粒之间的

分界限不明显. 实验所用的陶瓷器内部颗粒尺寸小于 10MHz 的超声波在其内部的波长. 超声波入射到陶瓷样品内部会在陶瓷颗粒边界产生瑞利散射. 因而陶瓷器不同部位对入射超声波形成的散射波不同, 这是用于辨识样品的依据所在.

实验表明, 本文提出的利用超声波在陶瓷器内部的背向散射信号间的欧氏距离的方法可以快速、准确地辨识陶瓷器(即使陶瓷器的外形完全一致), 且对样品没有任何破坏. 该方法可应用于对现代陶瓷器以及古陶瓷器的辨识.

## 参考文献

- [1] 许哲. 古陶瓷鉴定方法发展史初探[J]. 北方文物, 2011, (2): 44-47.

- [2] 律海明. 浅析古陶瓷的几种鉴定方法[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2014, (4): 90 – 94.
- [3] DEJOIE C, TAMURA N, KUNZ M, et al. Complementary use of monochromatic and white-beam X-ray micro-diffraction for the investigation of ancient materials[J]. Journal of Applied Crystallography, 2015, 48(5): 1522 – 1533.
- [4] SCIAU P, LEON Y, GOUDEAU P, et al. Reverse engineering the ancient ceramic technology based on X-ray fluorescence spectromicroscopy[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(5): 969 – 976.
- [5] PADELETTI G, FERMO P. A scientific approach to the attribution problem of renaissance ceramic productions based on chemical and mineralogical markers[J]. Applied Physics A, 2010, 100(3): 771 – 784.
- [6] FIGUEIREDO E, SILVA RJC, ARAUJO MF, et al. Identification of ancient gilding technology and late bronze age metallurgy by EDXRF, Micro-EDXRF, SEM-EDS and metallographic techniques[J]. Microchimica Acta, 2010, 168(3 – 4): 283 – 291.
- [7] SHI S, LIU Z G, SUN J T, ZHANG M, et al. Study of errors in ultrasonic heat meter measurements caused by impurities of water based on ultrasonic attenuation[J]. Journal of Hydro Dynamics, Ser B, 2015, 27(1): 141 – 149.
- [8] LI J, YANG L, ROKHLIN S I. Effect of texture and grain shape on ultrasonic backscattering in polycrystals[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1789 – 1803.
- [9] 贺西平, 田彦平, 张宏普. 超声无损评价金属材料晶粒尺寸的研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 445 – 451.
- [10] BUENOS A A, PEREIRA P, MEI P R, et al. Influence of grain size on the propagation of LCRCR waves in low carbon steel[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(4): 562 – 570.
- [11] 田彦平, 贺西平, 张宏普, 等. 基于声参量的金属材料辨识方法[J]. 陕西师范大学物理学报(自然科学版), 2014, 42(3): 34 – 40.
- [12] 谭飞刚, 刘伟铭, 黄玲, 等. 基于加权欧氏距离度量的目标再识别算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 88 – 94.
- [13] LI J, LU B L. An adaptive image Euclidean distance[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(3): 349 – 357.
- [14] 张闯, 王婷婷, 孙冬娇, 等. 基于欧氏距离的图像边缘检测[J]. 中国图像图形学报, 2013, 18(2): 176 – 183.
- [15] 张宏普, 贺西平, 贺升平, 等. 一种超声定点检测用探头固定装置[P]. 中国专利: CN201520540078. 2, 2015-11-18.
- [16] CERRILLO C, JIMENEZ A, RUFO M, et al. New contributions to granite characterization by ultrasonic testing[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 156 – 167.
- [17] LOBKIS O I, ROKHLIN S I. Characterization of ploy crystals with elongated duplex microstructure by inversion of backscattering data[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(16): 1 – 3.
- [18] 卢康, 贺西平, 卢炬, 等. 基于超声衰减系数谱辨识金属材料方法的适应性研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 46 – 52.

## 作者简介



安笑笑 女, 1993 年 3 月出生, 陕西耀州人, 2011 年毕业于天津理工大学应用物理专业, 现为陕西师范大学声学专业硕士在读生, 研究方向为超声波信号检测。  
E-mail: anxiaoxiao@snnu.edu.cn



贺西平(通讯作者) 男, 1965 年元月出生, 江西永新人, 教授, 博士生导师, 中国声学学会理事、中国机械工程学会特种加工分会超声加工委员会副主任, 研究方向为功率超声、超声检测。  
E-mail: hexiping@snnu.edu.cn