

# 基于孤立波的杨氏模量无损检测换能器研究

邓 雯, 杨建华, 张 扬

(西北工业大学自动化学院 西安 710072)

**摘要:**基于高度非线性孤立波的基本原理,设计了3个相同的采用PZT压电薄片作为压力传感器的换能器,并将换能器应用到无损检测中,测量了铁氟龙、花岗岩和不锈钢3种材料样本的杨氏模量值。测量结果显示非线性孤立波的特性与被测材料的弹性性质紧密相关。在对样本的100次测量结果中,3个换能器之间的偏差率仅为0.5%,单个换能器的测量结果的标准偏差与均值比低于0.4%,表明不同换能器之间的一致性、单个换能器的可重复性高。换能器测量得到的样本杨氏模量值与理论参数间的偏差率均低于3%,验证了换能器测量结果的可靠性。通过对比超声脉冲速度检测方法,进一步验证了换能器的经济适用性和测量结果的可靠性。

**关键词:** 高度非线性孤立波;换能器;无损检测;杨氏模量

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## HNSWs based transducers in measuring Young's modulus nondestructively

Deng Wen, Yang Jianhua, Zhang Yang

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Based on the fundamental theory of highly nonlinear solitary waves (HNSWs), three transducers embedded with PZT circular materials are investigated, and designed for the nondestructive testing (NDT) of the Young's Modulus of materials. Three different materials, including Teflon, granite and stainless steel, are tested by the transducers. The testing results show that the differences among transducers are below 0.5%, and the ratio between standard deviation and average value for single transducer is below 0.4%, which proves the high consistency and repeatability of the three transducers. The deviations from the theoretical analysis and the three materials are below 3%, which confirms the accuracy and reliability of the transducers. By comparing the results of Ultrasonic Pulse Velocity method, the HNSWs based transducers are more affordable, accurate and reliable.

**Keywords:** highly nonlinear solitary waves (HNSWs); transducer; nondestructive testing (NDT); Young's modulus

## 0 引 言

材料杨氏模量的测定在许多工程领域有着重要应用<sup>[1]</sup>,常用的方法包括有损检测和无损检测两种。其中,无损检测技术以其不损害检测对象使用性能、不伤害被检测对象内部组织的优点得到了广泛应用<sup>[2-3]</sup>。在众多无损检测方法中,超声检测<sup>[4-5]</sup>占有重要地位,具有被检测对象范围广,检测深度大;检测缺陷时定位准确,检测灵敏度高;对人体无害以及便于现场使用等特点。常用来检测材料杨氏模量的方法称为超声脉冲速度检测

(ultrasonic pulse velocity, UPV)<sup>[6]</sup>,通过测量超声脉冲在被测材料中传播速度,来确定材料杨氏模量。但是UPV方法的仪器成本高,超声脉冲在介质中传播时衰减大、容易发生折反射现象,测量时需要已知被测对象的深度。

近十年来,高度非线性孤立波(highly nonlinear solitary waves, HNSWs)成为无损检测领域的研究热点<sup>[7-9]</sup>。孤立波的特性与被测样本的材料的杨氏模量紧密相关,文献[10-11]定性地分析了不同材料与HNSWs特性的变化规律,文献[12]利用HNSWs监测水泥固化过程,并定性分析了固化过程中HNSWs参数的变化。

本文首先阐述了HNSWs基本原理与数值模型;然后

设计了一种基于 HNSWs 原理、以 PZT 压电材料作为传感器的换能器,通过测量铁氟龙、花岗岩和不锈钢的样本的杨氏模量,定量地分析 HNSWs 的特定参数与样本杨氏模量之间关系;最后通过对比 UPV 测量结果与理论参考值,验证了换能器的可重复性与测量结果的可靠性,以及不同换能器之间的高度一致性。相比于 UPV 方法,此换能器结构简单、成本低、对材料杨氏模量的变化敏感、测量结果更接近理论参考值、可用于现场测量并无需测量样本的几何尺寸。

### 1 换能器的数学模型与原理

图 1 所示为一个典型的一维弹性球体链模型。文献[7-8]验证了此类系统能够产生并传播 HNSWs;文献[13]研究了孤立波在一维颗粒链中的传播特性;文献[14-15]研究了 HNSWs 与材料之间的耦合特性。该链由  $N-1$  个完全相同的球体以及一个圆柱体构成。圆柱体的材料与质量与球体相同,处于球体链的中间(在图 1 编号为  $i$ )。顶端球体(编号为 1)从足够的高度自由落下并且撞击 2 号球体,产生一个单入射非线性孤立波(incident solitary wave, ISW)<sup>[11]</sup>,如图 1 中左侧实线波形。此入射波以力的形式从 2 号球体开始逐渐向链下端传播,且 1 号球体每撞击一次 2 号球体便产生一个 ISW。当 HNSWs 传播到球体链与样本的交界面,会产生多个自下向上传播的反射波(图 1 中虚线波形)。初次反射波(primary-reflected solitary wave, PSW)与 ISW 之间的时延用  $TOF_{PSW}$ (time of flight for PSW)表示,PSW 与 ISW 的幅值比表示为  $PSW/ISW$ 。

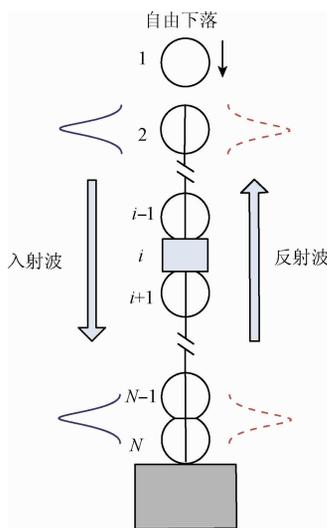


图 1 竖直弹性球体链模型

Fig. 1 Schematic diagram of the vertical 1-D elastic particle chain

到完整的入射与反射的孤立波,球体链的最中心位置放置一个嵌入了 PZT 薄片的圆柱传感器。利用圆柱体代替球体能更好地保证 PZT 平面始终垂直于竖直压力。

图 1 的球体链中,不同球体间、球体与圆柱体、球体与被测材料间的赫兹接触力  $F$  与相对位移  $\delta$  的关系<sup>[7,12]</sup>如式(1)所示。

$$F = A\delta^{3/2} \tag{1}$$

式中:系数  $A$  可由式(2)表示。

$$A = \begin{cases} A_c = E \sqrt{2a/3} (1 - \nu^2) \\ A_w = \frac{4\sqrt{a}}{3} \left( \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} \right) \end{cases} \tag{2}$$

式中: $A_c$  是球体与球体、球体与圆柱之间相互作用的因子, $A_w$  是球体与被测材料间相互作用的因子。 $E$ 、 $a$  和  $\nu$  分别表示球体的杨氏模量、半径以及泊松比, $E_w$  和  $\nu_w$  分别为被测材料的杨氏模量与泊松比。

相邻球体(或圆柱体)间的非线性作用以及链中零张力的性质促使了紧凑的 HNSWs 的形成以及传播。当 HNSWs 的波长远大于球体的直径时,孤立波的波速  $V_s$  由最大的动态应变  $\xi_m$  决定,即由最大的动态相互作用力  $F_m$  决定。当球体链处于静态预压力  $F_0$  作用下( $F_0 \ll F_m$ )时,系统的初始应变为  $\xi_0$ 。对于图 1 中的球体链系统,静预压力为组成球体链的球体与圆柱体的重力,因此只要顶端球体从足够的高度自由下落,即能确定  $F_0 \ll F_m$ 。HNSWs 在链中的传播速度  $V_s$  与标准化以后的最大应变  $\xi_r = \xi_m/\xi_0$ (或最大相互作用力  $F_r = F_m/F_0$ )有着非线性的关系<sup>[10,16]</sup>,如式(3)所示。

$$V_s = c_0 \frac{1}{\xi_r - 1} \left\{ \frac{4}{15} [3 + 2\xi_r^{5/2} - 5\xi_r] \right\}^{1/2} = 0.9314 \times \left[ \frac{4E^2 F_0}{\alpha^2 \rho^3 (1 - \nu^2)^2} \right]^{1/6} \frac{1}{f_r^{2/3} - 1} \left\{ \frac{4}{15} [3 + 2f_r^{5/3} - 5f_r^{2/3}] \right\}^{1/2} \tag{3}$$

式中: $\rho$  为组成球体链的材料的密度, $c_0$  是当  $F_m = F_0$  时链中的长波波速。

$$c_0 = \left( \frac{3}{2} \right)^{1/2} c \xi_0^{1/4} \tag{4}$$

$$c^2 = \frac{2E}{\pi\rho(1 - \nu^2)} \tag{5}$$

当  $F_0$  趋近于 0 时,式(3)的极值如(6)所示。

$$V_s = 0.6802 \left[ \frac{2E}{\alpha\rho^{3/2}(1 - \nu^2)} \right]^{1/3} F_m^{1/6} \tag{6}$$

已知球体链的  $F_0$  以及球体材料的杨氏模量、泊松比、半径等参数,结合式(1)~(3),求解  $A_c$ 、 $A_w$  参数的值,建立一个离散球体链的数学模型(discrete particle model, DPM),求解出每一个球体的赫兹接触力相对于时间的解。对于每一种被测材料,根据求解所得的经过中间圆柱体位置处的孤立波波波形图,可计算出 ISW 与

HNSWs 的波长大约等于 5 个球体的直径<sup>[7]</sup>,为观测

PSW 之间的时延  $TOF_{PSW}$  与幅值比  $PSW/ISW$ 。图 2(a)、(b)所示分别为  $TOF_{PSW}$  和  $PSW/ISW$  与被测材料的杨氏模量和泊松比的关系曲面。当被测材料的泊松比一定, 杨氏模量位于  $0 \sim 100$  GPa 时, 随着杨氏模量增加,  $TOF_{PSW}$  的值会明显降低,  $PSW/ISW$  的值会显著提高; 在杨氏模量大于 100 GPa,  $TOF_{PSW}$  和  $PSW/ISW$  则缓慢变化最后趋于一个常值。当杨氏模量一定, 泊松比位于  $0.10 \sim 0.40$  时,  $TOF_{PSW}$  值的变化率仅为 0.14%,  $PSW/ISW$  值的变化率也仅为 0.09%, 其影响可忽略不计。根据图 2 建立起  $TOF_{PSW}$  杨氏模量和  $PSW/ISW$  杨氏模量的数据库, 实验中获取  $TOF_{PSW}$  和  $PSW/ISW$  值, 可根据该数据库来查询对应的杨氏模量值。

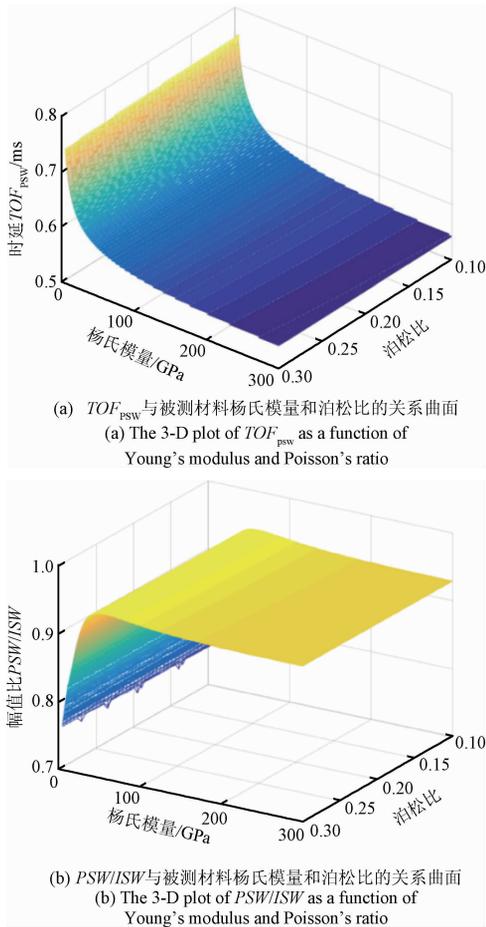


图2 数值模型的运算结果

Fig. 2 The calculation results of numerical model

用于实验的3种材料的理论参数如表1所示。

表1 三种被测材料的参数

Table 1 Parameters of different materials

材料名称	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
铁氟龙	1.46	0.46	2 200
花岗岩	61.0	0.27	2 750
不锈钢	193	0.28	7 800

图3所示为3种材料的数值仿真中, 中心圆柱体所受赫兹接触力随时间的变化曲线, 自上而下依次为测量不锈钢、花岗岩和铁氟龙材料的波形。

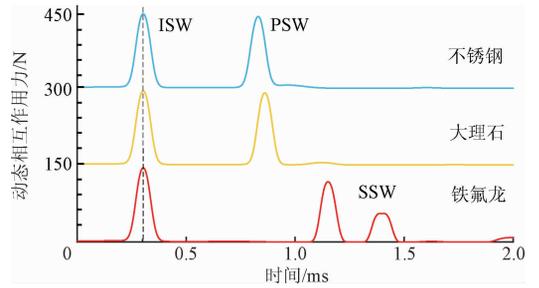


图3 测量不同材料时链中压力传感器所受赫兹接触力随时间变化曲线

Fig. 3 The Hertz contact force vs. time curves obtained by the pressure sensor when testing the three different specimens

图3所示的3条曲线中, 第1个驼峰为入射波 ISW, 第2个驼峰为初次反射波孤立波 PSW。检测铁氟龙样本的时候, 还出现了第3个显著的驼峰, 为二次反射孤立波 (secondary-reflected solitary wave, SSW); 此外3条曲线的 ISW 峰值相等、出现时间相同, 因为 ISW 仅仅与驱动球体的下落高度、材料性质相关; PSW 的峰值自上而下呈减小的趋势,  $TOF_{PSW}$  呈现增加的趋势, 结合图2与式(2)~(6)可知接触材料的杨氏模量越大, HNSWs 在球体与被测样本之间的作用时间越短, 因此  $TOF_{PSW}$  的值越小。

常用的 UPV 检测方法的装置有两种, 如图4所示。图4(a)模式中, 发射器与接收器分别位于被测样本的表面与底部, 轴心位于被测样本表面的法向。图4(b)为脉冲回波方法的装置, 发射器发射的超声脉冲信号传播到样本底部后被反射, 接收器接收反射的超声信号。两种测试装置都需要已知超声脉冲的传播距离。

本文所采用的被测样本都为标准长方体, 直接采用图4(a)所示装置。通过分析发射器发射波的时间与接收器接收到信号之间的时间差, 可以求出超声脉冲在样本中的传播速度。超声脉冲速度与均匀材料的杨氏模量、泊松比间的数值关系可归纳为:

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \quad (7)$$

式中:  $K = (1 - \nu) / ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))$ ,  $V$  为超声脉冲在材料中的传播速度,  $E$ 、 $\nu$ 、 $\rho$  分别为被测材料的杨氏模量、泊松比和密度。

图5所示为利用 UPV 方法测试样本时, 入射超声脉冲(实线)与接收到的超声脉冲(虚线)的波形示意图。

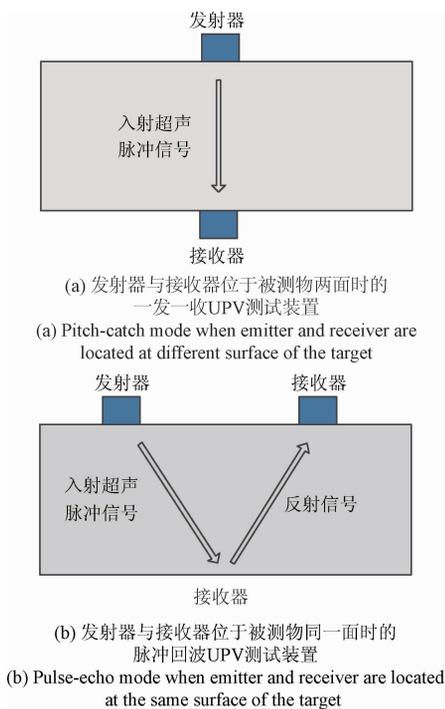


图 4 不同 UPV 测试装置

Fig. 4 Different set-ups of UPV tests

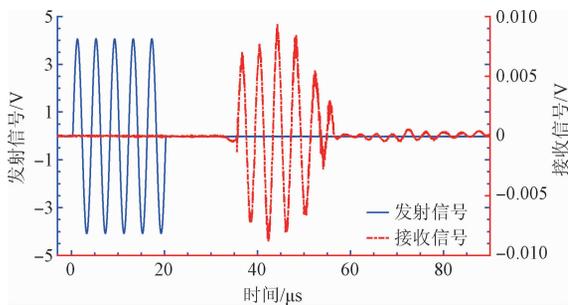


图 5 测量样本时入射与接收的超声脉冲示意图

Fig. 5 The emitted and received ultrasonic pulses

利用互相关函数算法可计算出入射与接收超声脉冲波的时间差(脉冲的传播时间),若已知被测材料的厚度(传播距离),就可得超声脉冲在样本中的传播速度  $V$ ,代入式(7)中,便可计算出样本的杨氏模量。

## 2 换能器结构与验证

换能器由 15 个直径相同的不锈钢弹性球体、一个质量和半径均与球体相同的圆柱体、PZT 压电薄片、电磁铁、薄铝片和一个聚甲醛树脂管组成,如图 6(a)所示。球体与圆柱体材料为 AISI 1020 (McMaster-Carr),直径  $a = 2R = 19.05 \text{ mm}$ ,密度  $\rho = 7\ 800 \text{ kg/m}^3$ ,质量  $m = 27.8 \text{ g}$ ,杨氏模量  $E = 193 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.29$ 。换能器

采用甲醛树脂管固定球体链,为减小球体与管壁摩擦力,内径略大于球体直径。

球体链顶端固定一块缠有铜丝的电磁铁作为换能器的驱动器,通过周期性通电从而吸起并释放顶端球体。此设计确保顶端球体始终从同一高度自由下落,以相同速度撞击球体链,从而激发性质相同的 HNSWs,保证了换能器的可重复性。

图 6(b)所示为换能器的压力传感器<sup>[17]</sup>结构,由不锈钢圆柱体与 PZT 薄片组成。圆形 PZT 压电薄片上下均黏贴绝缘层,用以隔离 PZT 与不锈钢圆柱体,防止电流外泄。

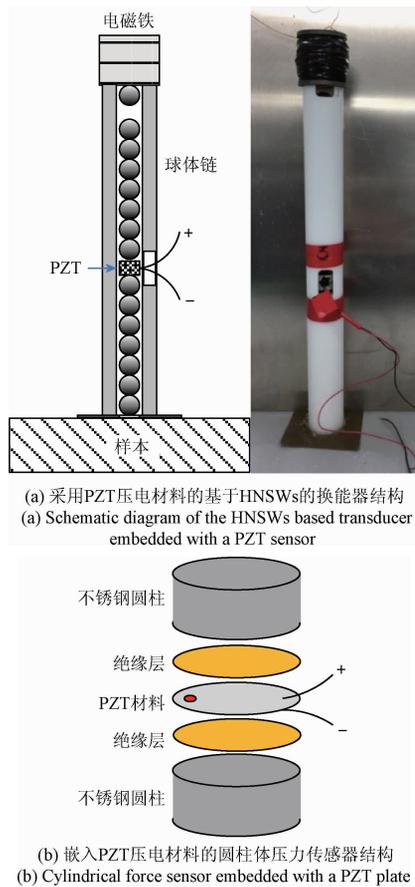


图 6 换能器结构

Fig. 6 Schematic of the transducer

换能器底端固定了一个薄铝片以支撑整个球体链,铝片中心有直径为 3 mm 的小孔,可以使球体链与材料直接接触作用,避免铝片给测量带入误差。

直流电源(BK PRECISION-1672)用来为顶端电磁铁供电,压力传感器的信号直接传输到 PXI (NI-1042Q) 系统的信号接收通道,设计的 LabVIEW 应用控制程序显示和存储信号。为降低测量误差,使用了 3 个相同图 6(a)所示的换能器。

图 7 所示为换能器测量铁氟龙、花岗岩和不锈钢样本时的装置示意图,其换能器竖直自由的放置在样本上,而

样本放置于不锈钢水平实验台上。



图7 换能器测试不同样本时的装置

Fig. 7 Three set-ups when testing the three different samples

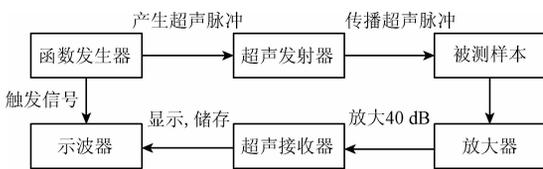
UPV 对比实验采用两个相同的纵波超声换能器 (Olympus V103-RM), 分别作为超声信号发射器与接收器, 如图8(a)所示。图8(b)所示为 UPV 测试装置, 发射器与接收器分别固定在被测样本两面。

图8(c)所示为整个 UPV 测试系统的结构框图。函数发生器生成 5 个周期频率为 500 kHz 的正弦超声脉冲, 共发射 100 个相同的脉冲, 每个脉冲之间的时间间隔为 10 ms, 超声接收器接收到放大后的信号后直接传输给示波器, 示波器对 100 次的接收信号做平均。



(a) Olympus 超声换能器  
(a) Ultrasonic transducers

(b) UPV 测试装置  
(b) UPV set-up



(c) 超声测试系统的结构组成与流程

(c) Flowchart and logic structure of the UPV system

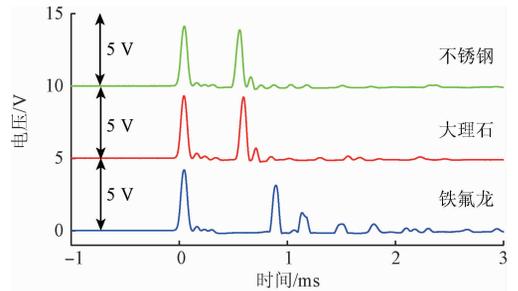
图8 UPV 检测系统结构

Fig. 8 Structure of UPV testing system

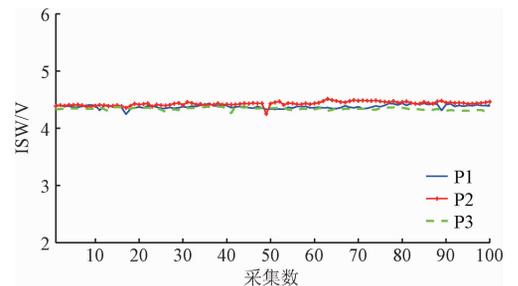
### 3 测量结果与对比

3 个换能器对每一个样本连续测量 100 次, 得到 900 组测量结果。图9(a)所示为 1 号换能器在测量 3 个样本时, 压力传感器得到的 3 个 HNSWs 的波形; 图9(b)所

示为 3 个换能器测量不锈钢样本时的 ISW 峰值。



(a) 1号换能器测试不同样本时压力传感器的信号波形  
(a) Waveforms obtained by the 1st transducer when testing different samples



(b) 1号换能器的压力传感器在测试每一种样本时100次测量的ISW峰值

(b) The amplitude of 100 ISWs for 1st transducers when testing the Teflon sample

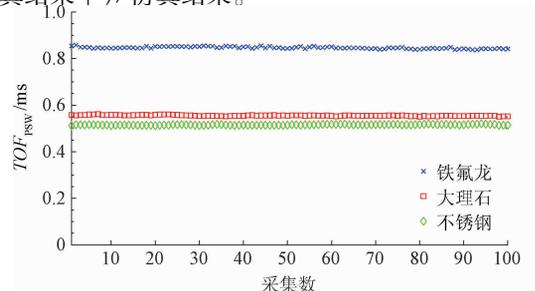
图9 换能器测量的波形

Fig. 9 Experimental results from the HNSWs based transducers

对于不同的被测样本, 同一换能器的 ISW 峰值保持稳定, 波动幅度小于均值的 0.4%; 对于同一被测材料, 不同换能器测量所得到的 HNSWs 的 ISW 峰值的相对偏差率低于 1%。因此换能器可重复性很高, 3 个换能器之间的一致性高。

图10(a)中每一条曲线对应 3 个换能器在测量同一个样本时的  $TOF_{PSW}$  均值, 其偏差率低于 0.5%; 图10(b)所示为 3 个样本对应的  $PSW/ISW$  均值。

如图10所示, 随着样本的杨氏模量增加,  $TOF_{PSW}$  的值逐渐降低,  $PSW/ISW$  的值随之升高。表2归纳了实验结果与数值仿真结果, 其中误差率定义为  $(|实验结果 - 仿真结果|) / 仿真结果$ 。



(a) 3个换能器每一次测量样本时  $TOF_{PSW}$  的均值

(a) Average  $TOF_{PSW}$  of the three transducers for every measurement

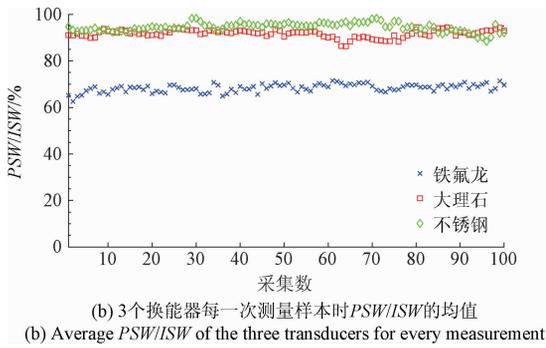


图 10 三个换能器测量结果的均值示意图

Fig. 10 Average value of the testing results from the three transducers for different materials

表 2 基于 HNSWs 的实验结果与仿真结果的对比

Table 2 Comparison between numerical and experimental results based on HNSWs

材料	$TOF_{PSW}/ms$			$PSW/ISW$		
	数值仿真	HNSWs 方法	误差率/%	数值仿真	HNSWs 方法	误差率/%
铁氟龙	0.847 5	0.846 4 ± 0.004 5	0.13	0.757 0	0.713 5 ± 0.017 1	5.74
花岗岩	0.560 0	0.555 3 ± 0.002 2	0.84	0.935 3	0.917 0 ± 0.016 3	1.96
不锈钢	0.520 0	0.515 3 ± 0.001 8	0.90	0.963 1	0.944 7 ± 0.018 9	1.91

表 3 杨氏模量的实验测量结果与理论参考值的对比

Table 3 Comparison of Young's modulus between theory and experiments

材料名称	参考值	杨氏模量/GPa			
		HNSWs 方法		UPV 方法	
		测量值	误差率/%	测量值	误差率/%
铁氟龙	1.46	1.51	3.42	1.41	3.42
花岗岩	61	64	4.92	52	14.75
不锈钢	193	194	0.52	200	3.63

基于 HNSWs 的方法所得到的样本的杨氏模量值与理论参考值间的误差率为 3%, 精度较高。UPV 方法在测量均匀材料 PTFE 与不锈钢时结果精度较高, 但是对于非均匀材料花岗岩, 测量结果与理论值之间的误差率达到 14.75%。超声脉冲在不同的材料中传播速度不相等, 花岗岩的组成成分复杂, 导致测量结果出现较大偏差。此外, 超声脉冲在传播过程中的反射、散射、衰减等因素, 使得接收到的脉冲信号幅值小, 信噪比低, 对脉冲速度带来计算误差。

两种无损检测方法都要求被测量的样本具有平坦的表面, 相比于 UPV 方法, 基于 HNSWs 的换能器的优势在于不用测量样本的尺寸, 测量系统结构简单, 信号的信噪比高无需使用放大器, 实验成本也更加低, 性价比高。此外, UPV 方法不适用于非均匀材料的测量, 而基于

如表 2 所示, 对于 3 类样本的  $TOF_{PSW}$  值, 实验结果与仿真结果之间的误差率都低于 1%, 相比之下  $PSW/ISW$  的差值率略大, 但仍然在 6% 以内, 所以基于 HNSWs 的换能器的测量结果的可靠性很高。引起实验误差的原因主要是波传播过程中, 球体与内壁摩擦力会产生能量损耗。由于  $TOF_{PSW}$  比  $PSW/ISW$  精确度高, 因此利用  $TOF_{PSW}$  杨氏模量的关系计算 3 个样本的杨氏模量。

UPV 方法测量得到的超声脉冲在铁氟龙、花岗岩和不锈钢样本中的传播速度依次为 1 721、5 020、5 725 m/s。

表 3 所示为 3 个样本的杨氏模量的理论参考值、基于 HNSWs 方法和 UPV 方法所得到的测量值。

HNSWs 的换能器不受样本内部结构均匀度的影响。

## 4 结 论

本文首先研究了基于 HNSWs 原理、采用 PZT 压电薄片作为传感器的换能器。然后分别使用此换能器和 UPV 无损检测方法测量 3 个不同材料样本的杨氏模量, 并且将两组实验的结果与理论参考值作比较, 分析了基于 HNSWs 的换能器的高度可重复性与精确性。最后通过对比两种无损检测方法的利弊, 证实了基于 HNSWs 换能器的经济实用性。由于换能器对实验环境和样本的均匀度要求不高, 并且可重复性高、实验结果准确, 因此在随后的研究中可考虑将该换能器更加广泛的应用于非均匀材料的无损检测与结构健康监测中, 如监测新鲜混凝土的固化过程、测量成熟混凝土的杨氏模量等。

## 参考文献

[ 1 ] 周晓明. 三种杨氏模量测量方法比较[J]. 实验科学与技术, 2011, 9(6): 97-99.  
ZHOU X M. A Comparison on measuring methods of young's modulus in physics experimental teaching[J]. Experiment Science and Technology, 2011, 9(6): 97-99.

[ 2 ] 潘亮, 董世运, 徐滨士, 等. 相控阵超声检测技术研究与应用概况[J]. 无损检测, 2013, 35(5): 26-29.  
PAN L, DONG SH Y, XU B SH, et al. The review of study and application of phased array ultrasonic testing

- technology[J]. *NDT*, 2013, 35(5): 26-29.
- [3] 魏勤, 卫婷, 董师润, 等. 超声波法测量金属材料的杨氏模量和剪切模量[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 26(1): 27-30.
- WEI Q, WEI T, DONG SH R, et al. Ultrasonic determination of Young's and shear modulus of metal materials[J]. *Journal of Jiangsu University: Science and Technology*, 2012, 26(1): 27-30.
- [4] 门平, 董世运, 康学良, 等. 材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5): 1101-1118.
- MEN P, DONG SH Y, KANG X L, et al. Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound[J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5): 1101-1118.
- [5] 朱红秀, 吴森, 刘卓然. 用于钢管缺陷检测的电磁超声传感器优化设计研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(12): 1734-1737.
- ZHU H X, WU M, LIU ZH R. Study on optimized design of electromagnetic acoustic transducer for steel pipe default detection [J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12): 1734-1737.
- [6] AMINI K, LESAK A, SOHAL A, et al. In using ultrasonic pulse velocity to predict properties and performance of pervious concrete[C]. *Proceedings of the Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, 2014.
- [7] NESTERENKO V F. Propagation of nonlinear compression pulses in granular media [J]. *Applied Mechanics and Technical Physical*, 1983, 24(5): 733-743.
- [8] COSTE C, FALCON E, FAUVE S. Solitary waves in a chain of beads under Hertz contact[J]. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary*, 1997, 56(5): 6104-6117.
- [9] DARAIO C, NESTERENKO V F, HERBOLD E, et al. Tunability of solitary wave properties in one-dimensional strongly nonlinear phononic crystals[J]. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary*, 2006, 73(2): 026610(1-10).
- [10] YANG J, SILVESTRO C, KHATRI D, et al. Interaction of highly nonlinear solitary waves with linear elastic media[J]. *Physical Review E Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2011, 83(4): 046606(1-12).
- [11] YANG J, KHATRI D, ANZEL P. Interaction of highly nonlinear solitary waves with thin plates[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2012, 49(3): 1463-1471.
- [12] NI X, RIZZO P, YANG J, et al. Monitoring the hydration of cement using highly nonlinear solitary waves[J]. *NDT & E International*, 2012, 52(4): 76-85.
- [13] 黄德财, 陈伟中, 杨安娜, 等. 孤立波在一维复合颗粒链中传播特性的模拟研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 266-271.
- HUANG D C, CHEN W ZH, YANG AN N, et al. Simulation study on the propagation of solitary waves in a one-dimensional composite granular chain [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 266-271.
- [14] 谢怡, 王砚. 高度非线性孤立波与弹性大板的耦合作用研究[J]. *固体力学学报*, 2017, 38(1): 65-73.
- XIE Y, WANG J. The coupling mechanism between highly nonlinear solitary waves with large plate [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanism*, 2017, 38(1): 65-73.
- [15] CAI L, RIZZO P, AL-NAZER L. On the coupling mechanism between nonlinear solitary waves and slender beams[J]. *International Journal of Solids & Structures*. 2013, 50: 4173-4183.
- [16] YANG J, RESTUCCIA F, DARAIO C. Highly nonlinear granular crystal sensor and actuator for delamination detection in composite structures [J]. *International Workshop on Structure Health Monitoring*, 2011: 123-134.
- [17] NI X, CAI L, RIZZO P. A comparative study on three different transducers for the measurement of nonlinear solitary waves[J]. *Sensors* 2013, 13(1): 1231-1246.

### 作者简介



邓雯, 2012年于西北工业大学获得学士学位, 现为西北工业大学自动化学院博士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: dengwen0626@126.com

**Deng Wen** received her B.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2012. Now she is a Ph.D. candidate in School of Automation, Northwestern Polytechnical University. Her research interests include detecting techniques and automatic devices.



杨建华(通讯作者), 1989年于西安电子科技大学获得学士学位, 分别在1992年和2002年于西北工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学自动化学院教授、博导, 主要研究方向为新型传感器、集成测试技术与工业图像处理。

E-mail: yangjianhua@nwpu.edu.cn

**Yang Jianhua** (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Xidian University in 1989, received her M.Sc. and Ph.D. degrees both from Northwestern Polytechnical University in 1992 and 2002, respectively. Now she is a professor in School of Automation, Northwestern Polytechnical University. Her main research interests include innovative sensors, integrated test facility and industrial image processing.