

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108375

# 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究\*

沈意平<sup>1,2</sup>, 吴迪<sup>2</sup>, 张博南<sup>2</sup>, 毕超<sup>3</sup>, 蒋帅<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201; 2. 北京信泰智合科技发展有限公司  
北京 100098; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所 北京 100081)

**摘要:**钢轨裂纹监测是保障铁路基础部件安全的重要研究课题之一。超声导波在钢轨中具有衰减小、传感距离远、检测效率高等优点,可实现钢轨长距离快速检测。传统的超声导波传感器大都采用PZT陶瓷制成,质地硬脆、易碎裂,不能满足钢轨长期在线监测使用要求。本文提出将柔性0~3型PZT/环氧树脂复合材料用作钢轨超声导波传感器,实验研究该柔性压电复合材料的力学性能及其对导波的传感特性,结合有限元仿真分析和实验测试,分析了钢轨中激励导波模态特性及其裂纹反射波的延迟到达时间,探讨压电复合材料传感器应用钢轨裂纹导波信号检测的适用性和有效性。研究结果表明:PZT/环氧树脂复合材料传感器具有良好的柔韧性和线性灵敏度,在5℃~75℃温度范围内能够有效检测到导波信号;不同传感路径得到的钢轨导波检测信号与有限元仿真信号基本一致,裂纹反射波到达时间相近,这将为钢轨裂纹在线监测提供新型的柔性压电复合材料传感技术。

**关键词:**PZT/环氧树脂复合材料;超声导波;钢轨;裂纹;到达时间

中图分类号: TH878 TB559 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Research on flexible piezoelectric composite sensing technology for guided wave detection of rail cracks

Shen Yiping<sup>1,2</sup>, Wu Di<sup>2</sup>, Zhang Bonan<sup>2</sup>, Bi Chao<sup>3</sup>, Jiang Shuai<sup>1</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Beijing Xintai Zhihe Technology Development Co., Ltd., Beijing 100098, China;  
3. Metals & Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:**The rail crack monitoring is a hot research topic to ensure the safety of railway foundation components. The ultrasonic guided wave has the advantages of small attenuation, long propagation distance and high detection efficiency in the rail, which can realize long-distance rapid detection of the rail. The traditional ultrasonic guided wave sensors are generally made by the piezoelectric ceramics. Due to their brittleness and hardness, the traditional PZT ceramic sensors are not suitable for long-term online monitoring of the rail. In this article, the Flexible 0~3 type of PZT/epoxy piezoelectric composite is prepared and used as an ultrasonic guided wave sensor. The mechanical properties of the flexible piezoelectric composite and its sensing characteristics for guided waves are investigated by experiments. Combined with the finite element simulation analysis and experiment test, the mode of the excited guided waves and the delay arrival time of the reflected wave from cracks in the rail are analyzed. The applicability and effectiveness of the piezoelectric composite sensor for rail crack guided wave signal detection are discussed. Results indicate that the PZT/epoxy composite sensor has well flexibility and linear sensitivity, which is adaptable to detect the guided wave under ambient temperature between 5℃ and 75℃. The guided wave detection signals obtained from different sensing paths of the rail are consistent with the finite element simulation signals. Their arrival time of the crack reflection waves are same. The research provides a new type of flexible piezoelectric sensing technology for on-line monitoring of the rail crack.

**Keywords:**PZT/epoxy resin composites; ultrasonic guided wave; rail; crack; arrival time

收稿日期:2021-08-07 Received Date: 2020-08-07

\*基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFF01015400ZL)资助

## 0 引言

钢轨作为铁路运输的重要承载基础部件,长期重负荷冲击作用下容易产生各种损伤,给列车运行安全带来重大的安全隐患。裂纹是引起钢轨断裂导致发生列车出轨、倾覆等重大事故的一个重要因素<sup>[1-2]</sup>。目前搭载超声、电磁、视觉等探伤仪器系统的钢轨探伤车广泛用于铁路钢轨巡检。随着高速铁路快速发展,钢轨巡检与维护的天窗时间大幅缩短,传统的钢轨巡检探伤方法无法满足远距离钢轨检测需求<sup>[3-4]</sup>。超声导波具有衰减小、传播距离远、检测效率高等优点,可实现钢轨长距离快速检测,具有良好的应用前景。通过固定安装传感器来接收钢轨中的导波信号,实现钢轨结构损伤状态的在线检测,特别是对于轻度损伤加固钢轨的实时监测,有助于全面了解钢轨的损伤演化状态,提高钢轨的保障维护和安全能力。

由于钢轨具有复杂且不规则的 I 型截面结构,钢轨中导波模态多,研究者们在钢轨中导波频散特性、模态选择等方面开展了大量的研究<sup>[3-7]</sup>。钢轨裂纹在线检测要求长期固定安装的传感器尺寸小、质量轻,能够适应于钢轨不规则结构表面和野外恶劣服役条件。现有研究常采用斜劈压电探头进行导波的激励与接收,探头为硬质大块体结构,不便于固定安装于钢轨结构上。压电片响应快、频响宽且易于集成,将其布置成压电传感器阵列,能够实现钢轨中裂纹的定量检测<sup>[8]</sup>。传统的压电片常采用锆钛酸铅陶瓷片(piezoelectric ceramic, PZT),其质地硬脆、易碎裂,不能满足钢轨长期在线监测使用要求。

近年来,0~3 型压电复合材料受到国内外研究者的广泛关注。该材料将不连续的 PZT 颗粒分散于三维连通的聚合物中,具有制备简单、柔性好、压电性能优良等优点。Hanner 等<sup>[9]</sup>和张洪涛等<sup>[10]</sup>学者们探讨了不同 PZT 颗粒与聚合物复合制备材料的性能影响因素。Egusa 等<sup>[11]</sup>和 Zhang 等<sup>[12]</sup>采用涂覆法将 PZT 颗粒与环氧树脂复合制成压电涂层,将其用作振动和声传感器接收薄板振动和声信号。Hale 等<sup>[13]</sup>将压电涂层用作应变传感器用于监测桥梁振动,长达 20 个月的野外测试表明该类传感器具有良好的环境适应性。Yang 等<sup>[14]</sup>采用流延法制备 PZT/环氧树脂复合材料,类似地,Kang 等<sup>[15]</sup>制备了 PNN-PZT/环氧树脂复合材料,并开展实验验证其用于风力机叶片鸟撞声发射信号监测的可行性。Yoo 等<sup>[16]</sup>将 PZT/环氧树脂复合材料用于构建不同布置方式的二维传感器阵列,用于检测铝板中 Lamb 波信号并进行损伤识别。杨照光等<sup>[17]</sup>探讨了 PZT/P(VDF-TFE) 复合材料用于接收声发射的可行性。

项目组前期研究了质量比、极化电场、极化温度和极化时间等因素对 0~3 型 PZT/环氧树脂复合材料性能的影响,并将其用于曲面板 Lamb 波信号传感<sup>[18]</sup>。研究表明,PZT/环氧树脂复合材料具有良好的传感响应特性,能够很好地贴合于曲面板表面。进一步地,本文将重点研究 PZT/环氧树脂复合材料的力学性能及其对导波的传感特性,结合有限元仿真和实验研究,探讨该柔性压电复合材料传感器应用于钢轨裂纹导波检测的适用性和有效性。

## 1 柔性 PZT/环氧树脂压电复合材料性能

本文采用的柔性压电复合材料由 PZT-5A 压电陶瓷粉体和环氧树脂复合制备而成。PZT 粉体由江苏派州电子科技有限公司提供,平均粒径为 100 μm。环氧树脂由深圳市达利森科技有限公司提供,型号为 SY-3150A。将 PZT 粉体按一定质量比与环氧树脂均匀混合,形成的糊状物注入成型模具,常温 10 MPa 保压固化约 8 h<sup>[18]</sup>。当 PZT 粉体与环氧树脂质量比为 7:1、极化电场为 5 kV/mm、极化温度为 100℃ 时,复合材料  $d_{33}$  值达到最大值 74 pC/N,相对介电常数  $\epsilon_r$  达 56,介电损耗小于 0.02。制备的 PZT/环氧树脂压电复合材料实物如图 1(a)所示,该材料具有良好的柔韧性和可裁剪设计性。采用电子扫描显微镜分析复合材料的微观结构形貌,如图 1(b)所示,可以看出 PZT 颗粒均匀分布在环氧树脂间,气孔和间隙等缺陷较少,复合材料具有良好的致密性。

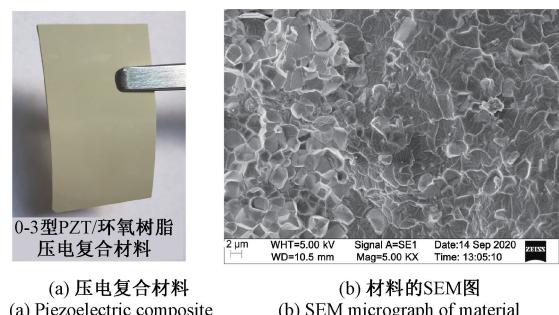


图 1 PZT/环氧树脂复合材料

Fig. 1 PZT/epoxy resin composite

为了表征压电复合材料的柔韧性,开展 PZT/环氧树脂复合材料的拉伸实验,以获得材料的弹性模量。试件按国标 GB/T 1040-92 制备,试件尺寸如图 2(a) 所示。拉伸实验采用 WDW-10 型万能试验机,如图 2(b) 所示,根据试件加载力和伸长量的试验数据,可以计算其弹性模量。图 2(c) 所示为拉伸实验测试得到的应变和应力曲线,可以看出,压电复合材料的应力和应变并不是呈严格的线性关系,在 <5% 应变范围内,弹性模量约为 6.31 MPa,即为图 2(c) 中拟合直线斜率。钢轨存在复杂且不规则的结构

表面,不同部位上能够布置传感器的位置有限,柔性压电复合材料能够直接粘贴于钢轨过渡圆弧面,无需平整钢轨表面,具有良好的不规则结构表面适用性。

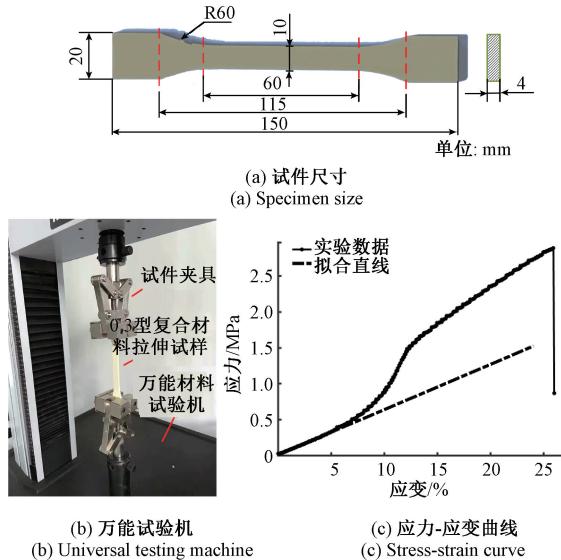


图2 拉伸实验

Fig. 2 Tensile test

## 2 柔性压电复合材料传感响应特性

### 2.1 压电复合材料传感器对导波的传感响应

本文将0~3型PZT/环氧树脂复合材料制成直径为20 mm、厚度为1 mm的传感元件,上下表面涂刷导电银胶来制作电极,极化方向为其厚度方向。图3所示为理论推导柔性压电复合材料对导波传感响应的直角和极坐标系。根据压电方程<sup>[12, 19]</sup>,压电复合材料传感器表面产生的电荷可写为:

$$q = Ed_{31} \iint_A \varepsilon_{ii} dA \quad (1)$$

式中:E为压电复合材料的弹性模量;  $d_{31}$ 为压电常数,约为0.5  $d_{33}$ ;  $\varepsilon_{ii}$ 为导波传播时结构表面应变的和值,即  $\varepsilon_{ii} = \varepsilon_x + \varepsilon_y = \varepsilon_{x'}$ ; A为该传感器的面积。

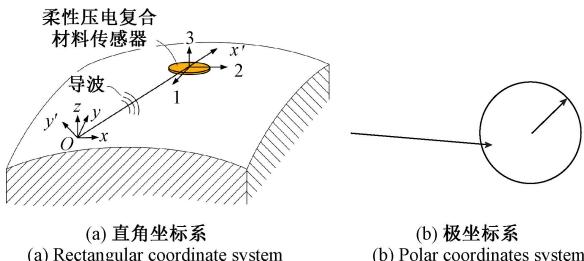


图3 压电复合材料对导波传感响应

Fig. 3 The response of the piezoelectric composite to guided wave

将压电复合材料视为电容器,其电容为:

$$C_p = e_{33} \pi r_s^2 / t_s \quad (2)$$

式中: $e_{33}$ 为压电复合材料传感器的介电常数; $r_s$ 和 $t_s$ 分别为其半径和厚度。

根据式(1)和(2),压电复合材料传感器对导波的传感响应电压为:

$$V = \frac{q}{C_p} = \frac{Ed_{31}t_s}{e_{33}\pi r_s^2} \iint_A \varepsilon_{ii} dA \quad (3)$$

将导波传播时结构表面应变表达式代入式(3),即可获得压电复合材料传感电压响应。本文第3.1节将分析钢轨中激励导波特性,此处以轨腰激励产生的Lamb波  $A_0$  模态为例,推导压电复合材料传感器对导波的传感响应电压输出。轨腰中Lamb波  $A_0$  模态沿  $x'$  传播时,结构表面应变为<sup>[20]</sup>:

$$\varepsilon_{x'} = ik^2 E \left( \tanh ah - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \tanh bh \right) e^{i(kx' - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (4)$$

式中:E为任意常数;h为板厚。

参数a和b表达式为:

$$a = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_L^2}}, \quad b = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_T^2}} \quad (5)$$

式中: $c_L$ 和 $c_T$ 分别为纵波和横波波速。

将式(4)和(5)分别代入式(3),可以计算得到压电复合材料对Lamb波的传感响应电压输出:

$$V = \frac{iEd_{31}t_s k^2 N}{e_{33}\pi r_s^2} \iint_A e^{i(kx' - \omega t - \frac{\pi}{2})} dx dy \quad (6)$$

上式中常数N为:

$$N = \left( \tanh ah - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \tanh bh \right) \quad (7)$$

在图3(b)所示极坐标系中,式(6)可写为:

$$V = \frac{2Ed_{31}t_s k^2 N i}{e_{33}\pi r_s^2} \int_0^{\theta_{\max}} \int_{r_{\min}(\theta)}^{r_{\max}(\theta)} e^{i(kr - \omega t - \frac{\pi}{2})} r dr d\theta \quad (8)$$

根据该传感点位置,式(8)积分边界定义为:

$$\begin{cases} r_{\min/\max}(\theta) = r_a \cos \theta \pm \sqrt{r_s^2 - r_a^2 \sin^2 \theta} \\ \theta_{\max} = \sin^{-1} \sqrt{r_s/r_a} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)可以采用数值方法计算,类似圆形压电片传感响应特性分析<sup>[21]</sup>,压电复合材料对结构表面导波的传感响应电压与面内应变和传播距离及传感器尺寸相关,能够用于钢轨裂纹损伤导波信号检测。

### 2.2 压电复合材料传感器的灵敏度

为掌握压电复合材料传感器对导波传感的灵敏度,开展了不同高度的落球冲击铝板实验。实验系统如图4(a)所示,实验铝板尺寸为1 m×1 m×1.5 mm,两侧搁置在支撑支架上;钢球直径8 mm,质量3.9 g。采用人工释放钢球,落球高度设置为5 cm~50 cm,间隔5 cm,共10组高度。压电复合材料传感器通过环氧树脂粘贴在

铝板表面,距离钢球冲击落点 15 cm 的位置。传感器上下表面电极连线接入前置放大器 PXPA3,采用 NI 6366 数据采集卡进行冲击信号采集。实验测试采样频率设为 2 MHz,采用均值平滑滤波方法提高信号信噪比,将同一落球高度 10 次落球冲击测试数据平均,图 4(b)为落球高度 30 cm 时得到的冲击信号。

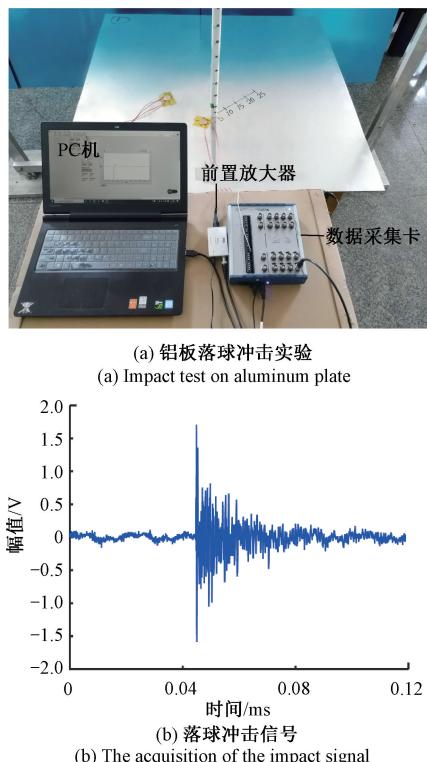


图 4 压电复合材料传感灵敏度实验  
Fig. 4 Sensor sensitivity experiment of the piezoelectric composite

通过对冲击信号进行希尔伯特变换,提取包络谱幅值表征冲击响应幅值,采用最小二乘法拟合其与落球高度的关系,如图 5 所示。从图 5 可以看出,压电复合材料传感器检测的冲击响应信号幅值随着落球高度增加而增大,在 5~35 cm 高度范围内具有良好的线性关系;落球高度大于 35 cm 时,人工释放钢球存在的高度和位置误差使得落球冲击点更加分散,因此传感器响应幅值波动较大。

### 2.3 压电复合材料传感器的环境温度适应性

野外工作环境中钢轨温度变化范围大,因此要求压电复合材料传感器在较大的温度变化下能够有效地接收到导波信号。实验仍采用铝板作为基板,压电片用作激励器,压电复合材料传感器用于接收铝板中的 Lamb 波,两者间距离为 0.2 m,开展传感器温度适应性实验,实验原理如图 6 所示。

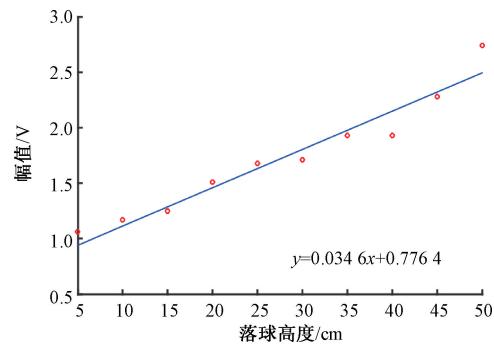


图 5 压电复合材料的传感灵敏度  
Fig. 5 Sensing sensitivity of the piezoelectric composite

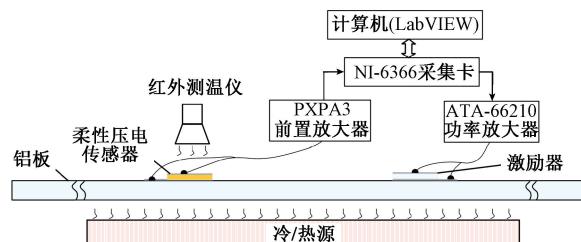


图 6 传感器温度适应性实验原理  
Fig. 6 Temperature applicability experimental diagram of the developed sensor

实验测试时铝板检测区域温度控制在 5℃~75℃,间隔 10℃ 进行导波检测。采用两块 0.5 m×0.25 m×0.1 m 的冰块进行降温,控制铝板实验件温度为 5℃~25℃;通过电阻加热器进行升温,控制铝板实验件温度为 35℃~75℃。激励压电片来自 Piezo 公司,直径为 12.7 mm。激励波采用汉宁窗调制的五周正弦窄带信号,采用 LabVIEW 编程发生激励波信号,经 Agitek 公司的 ATA-66210 功率放大器进行电压放大后驱动压电片。压电复合材料传感器信号经过前置放大器 PXPA3,利用 NI 6366 数据采集卡进行导波采集。

低频激励下铝板中传播的 Lamb 波主要存在  $A_0$  和  $S_0$  模态,其群速度曲线如图 7(a)所示。考虑到激励压电片和压电复合材料传感器距离为 0.2 m,根据群速度曲线选择激励频率为 200 kHz,此时  $A_0$  和  $S_0$  波包分离无混叠,将具有较好的时域分辨率,图 7(b)所示为经过功率放大器施加到压电片的激励信号。

温度适应性实验过程中,采样频率为 2 MHz,铝板温度采用龙韵红外测温仪 LR03 测量;同一温度下,利用均值平滑滤波方法提高信号信噪比,将 100 次激励采集的 100 组导波信号进行平均。由于外界环境温度影响,开展传感器检测 Lamb 波实验时温度存在±1℃ 的波动。不同温度下压电复合材料传感器采集的 Lamb 波信号如图 8 所示,根据群速度曲线可知,接收波包为  $A_0$  和  $S_0$

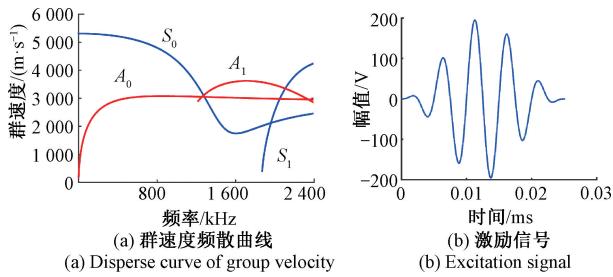


图7 铝板频散曲线与压电片激励信号

Fig. 7 Disperse curve of the aluminum plate and the excitation signal of the piezoelectric slice

波,波速为2 554和5 286 m/s。从图8可以看出,在5℃~75℃温度范围内,传感器能够有效地检测到\$A\_0\$和\$S\_0\$波,幅值随着温度升高而降低。这表明该传感器能够适应于野外钢轨裂纹的长期监测,实际应用时需要根据环境温度对其幅值进行标定。

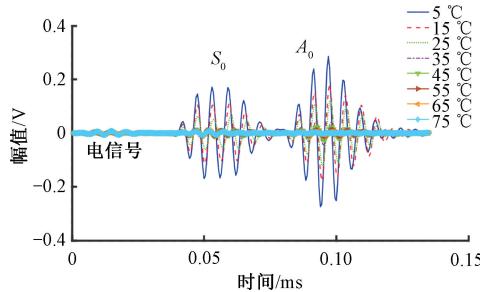


图8 压电复合材料传感器的温度适应性

Fig. 8 Temperature applicability of the piezoelectric composite sensor

### 3 钢轨裂纹导波检测

我国高铁线路铺设的U60型钢轨截面的主要几何尺寸参数如图9所示。由于钢轨复杂且不规则的I型截面结构,导波频散特性非常复杂。现有研究表明<sup>[4-5]</sup>:随着导波频率的增加,不同振型的导波能量集中于轨头、轨腰和轨底,且类似于板中Lamb波模态;高频频散具有良好的非频散特性,即特定模式的群速度变化很小,这有利于检测钢轨不同部位的细小裂纹。

由于钢轨结构的复杂性,钢轨中不同部位激励产生的导波模态不同,在钢轨中传播时将发生模态转换。本节首先分析轨头和轨腰激发导波的传播特性,进而分析三维钢轨中裂纹损伤信号,探讨柔性压电复合材料传感器检测钢轨裂纹导波信号的可行性和有效性。采用的U60型钢轨实验试件长度为1 m,自由放置在实验台面上。在距离轨头端面0.12 m处切割横向裂纹,深度为5 mm,宽度为0.3 mm。传感器布置如图10所示,压电复

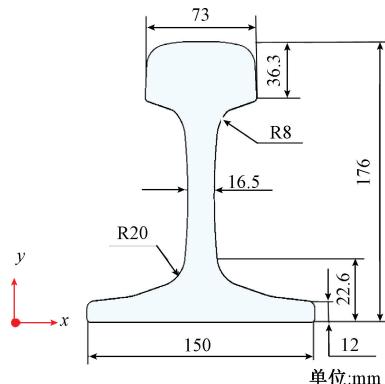


图9 钢轨结构参数

Fig. 9 Rail structure parameters

合材料传感器\$P\_1\$和\$P\_2\$布置在距离裂纹0.075 m的轨头和轨腰中部,激励压电片\$P\_3\$和\$P\_4\$分别布置在距离裂纹0.21 m的轨头和轨腰中部,传感阵列共形成4条传感路径。钢轨导波激发和传感采用的仪器包括ATA-66210功率放大器、NI 6366数据采集卡和PXPA3前置放大器。

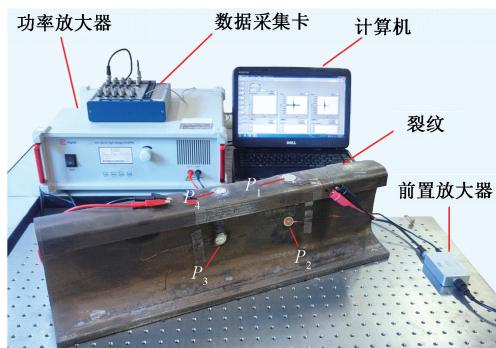


图10 钢轨试件测试实物及传感器布置位置

Fig. 10 Rail specimen with sensor layout position

### 3.1 钢轨中激励导波特性分析

本文采用有限元仿真和实验测试相结合的方法,研究钢轨中激励导波的模态及其传播速度。钢轨弹性模量为210 GPa,密度\$7\ 850\ kg/m^3\$,泊松比为0.28。采用有限元软件Abaqus进行仿真分析,钢轨截面网格尺寸设为3 mm,沿钢轨长度方向拉伸的网格尺寸为1 mm,六面体单元总数为95.4万,裂纹采用去除单元模拟。钢轨不施加任何约束,压电片布置位置的节点施加面外位移激励,时间步长设为\$8\times10^{-8}\ s\$。激励信号仍采用2.3节所示的五周正弦窄带波。

为了确定的激励频率,以轨头\$P\_4\$压电片为激励点,通过分析压电复合材料传感器\$P\_1\$检测信号的时域分辨率来确定激励频率。激励频率范围为60~200 kHz,间隔20 kHz,图11所示为不同频率下传感器\$P\_1\$采集得到的导波信号。从图11可以看出,导波信号中存在电信号,

60~120 kHz 时首达波与电信号混叠; 高于 160 kHz 后导波信号首达波具有较好的时域分辨率, 且在 160~200 kHz 频率范围内具有较好的非频散特性。本文选择 180 kHz 作为钢轨导波检测的激励频率。

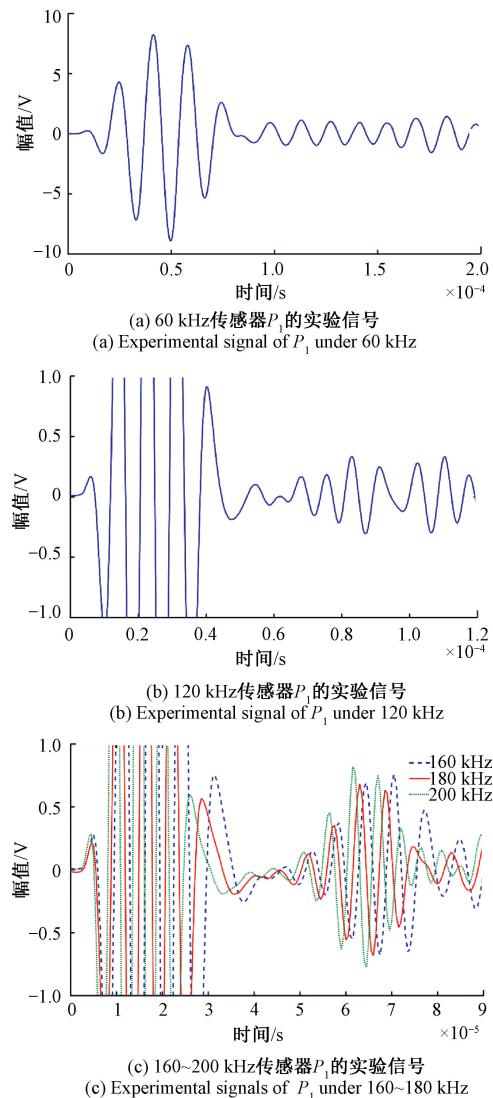


图 11 不同频率下压电复合材料传感器  $P_1$  的实验信号

Fig. 11 Experimental signals of the piezoelectric composite sensor  $P_1$  under different excitation frequencies

激励频率 180 kHz 下, 轨头中传感路径  $P_4 \sim P_1$  首达波如图 12(a) 所示, 可以看出, 压电复合材料传感器接收的钢轨导波信号与有限元仿真分析基本一致, 两者之间的差异主要来源于实验测试噪声干扰和仿真分析模型的理想化, 这表明压电复合材料传感器能够有效地应用于钢轨裂纹导波检测。由于轨头在高频段的导波模态较多, 难以判断该波包模态, 但可以提取波包到达时间来计算其波速, 得其实验波速为 2 452 m/s。

轨腰中传感路径  $P_3 \sim P_2$  首达波如图 12(b) 所示, 可知实验测试得到的首达波信号存在明显的波包混叠。本文采用匹配追踪方法进行首达波实验信号分析<sup>[22]</sup>, 分离得到的两个波包如图 12(c), 利用其到达时间计算得到两个波包的实验波速分别为 4 483 m/s 和 3 365 m/s。将轨腰视为板结构, 计算其频散曲线, 见图 13 所示, 180 kHz 频率下  $S_1$  和  $A_0$  模态的理论波速分别为 4 315 和 3 143 m/s, 与实验波速基本一致。因此, 可以判断轨腰中传感路径  $P_3 \sim P_2$  首达波为  $S_1$  和  $A_0$  模态的混叠波, 其中  $A_0$  模态为主导。

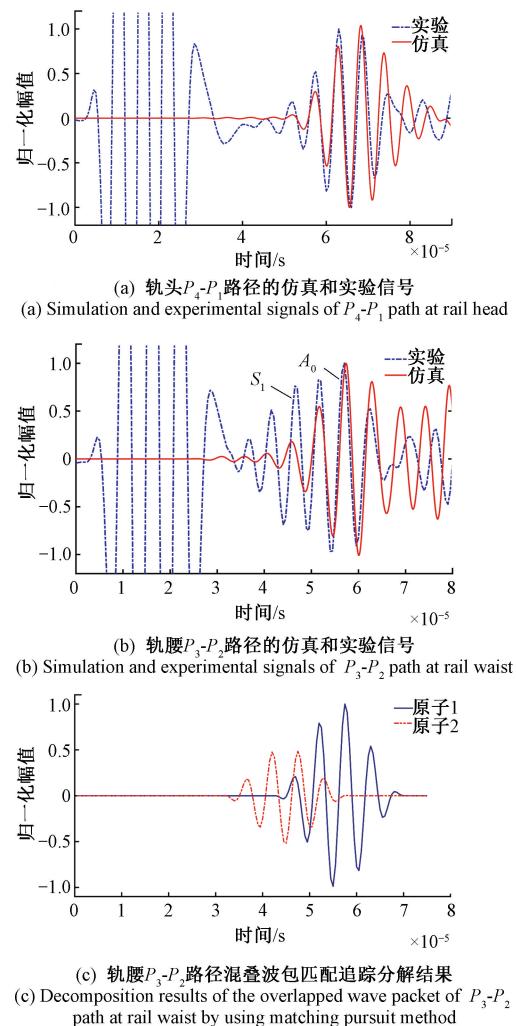


图 12 180 kHz 频率下钢轨导波的仿真与实验信号

Fig. 12 Simulation and experimental signals of rail guided wave at 180 kHz

### 3.2 钢轨裂纹损伤信号分析

根据钢轨中激励导波特性可知, 导波在钢轨中传播不同于规则的二维板结构, 复杂而不规则结构造成钢轨中导波在不同部位的波速变化和模态转换, 裂纹损伤波

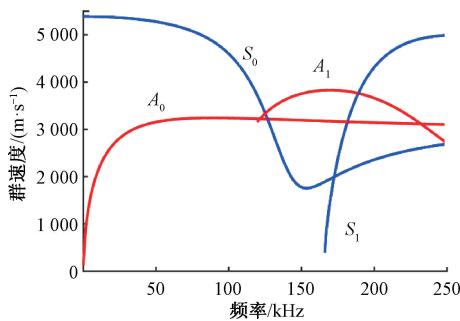
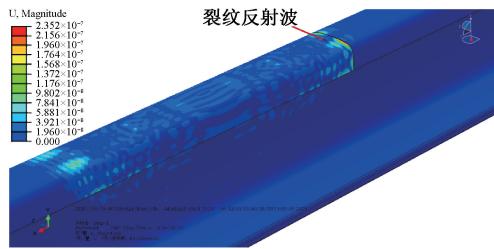


图 13 轨腰板结构的群速度曲线

Fig. 13 Group velocity curve of rail waist plate structure

包分析需要综合考虑传感路径在轨头和轨腰的分段分布情况。通过有限元仿真分析,轨头  $P_4$  压电片激励时钢轨裂纹处产生反射时的位移云图,如图 14 所示。

图 14 轨头  $P_4$  激励导波的裂纹散射位移云图Fig. 14 Displacement nephogram of the scattering guided wave excited by actuator  $P_4$  at rail head

从图 14 可以看出,导波与裂纹作用时产生反射波较强,而透射波较弱。考虑钢轨三维结构,裂纹反射波延迟到达时间的表达式写为<sup>[8]</sup>:

$$\Delta t_{ij} = \frac{L_{P_i D} + L_{DP_j}}{c_g} - \frac{L_{P_i P_j}}{c_g} \quad (10)$$

式中:  $L_{P_i D}$ 、 $L_{DP_j}$  和  $L_{P_i P_j}$  为激励器  $P_i$  和传感器  $P_j$  与损伤  $D$  的空间直线距离,其计算式为:

$$L_{P_i D} = \sqrt{(x_{P_i} - x_D)^2 + (y_{P_i} - y_D)^2 + (z_{P_i} - z_D)^2},$$

$$L_{DP_j} = \sqrt{(x_D - x_{P_j})^2 + (y_D - y_{P_j})^2 + (z_D - z_{P_j})^2},$$

$$L_{P_i P_j} = \sqrt{(x_{P_i} - x_{P_j})^2 + (y_{P_i} - y_{P_j})^2 + (z_{P_i} - z_{P_j})^2}.$$

由于钢轨中导波在轨头和轨腰的不同波速及存在的模态转换,裂纹反射波到达时间需要根据传感路径在钢轨不同部位的距离分段计算。图 15(a)为轨头中路径  $P_4 \sim P_1$  的健康和裂纹散射仿真信号,此时导波主要在轨头传播,裂纹反射波到达时间为  $116 \mu s$ ,与轨头实验波速计算得到的损伤波到达时间相同。图 15(b)和(c)为传感路径  $P_4 \sim P_2$  和  $P_3 \sim P_2$  的健康和损伤仿真信号,此时导波通过轨头和轨腰过渡区时发生模式转换。将图 15(b)

与图 15(a)对比可知,尽管  $L_{P_4 P_2} > L_{P_4 P_1}$ ,但是  $P_4 \sim P_2$  路径首波到达时间要早于  $P_4 \sim P_1$  路径,其裂纹反射波到达时间需要根据式(10)进行分段计算。将健康和损伤信号作差,利用匹配追踪方法进行差信号分析,提取路径  $P_4 \sim P_2$  和  $P_3 \sim P_2$  裂纹反射波到达时间分别为  $143$  和  $127 \mu s$ 。根据激励点、传感点与损伤之间的路径距离以及轨头、轨腰波速,计算路径  $P_4 \sim P_2$  和  $P_3 \sim P_2$  上裂纹反射波到达时间分别为  $145$  和  $128 \mu s$ ,与仿真信号裂纹反射波到达时间相近,时间差异是由于轨头和轨腰过渡段的波速变化没有考虑。

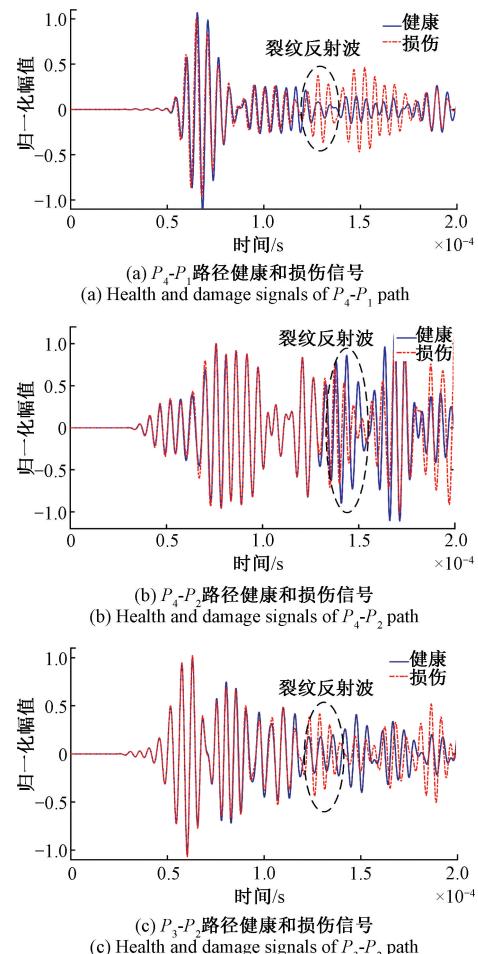


图 15 健康与裂纹损伤有限元仿真信号

Fig. 15 Finite element simulation signals of health and crack damage

钢轨中传感路径  $P_4 \sim P_1$ 、 $P_4 \sim P_2$  和  $P_3 \sim P_2$  的裂纹损伤实验信号如图 16 所示。类似地,分析得到其裂纹反射波到达时间分别为  $110$ 、 $142$  和  $126 \mu s$ 。有限元仿真分析、实验和理论分析得到的裂纹反射波到达时间列于表 1,结合图 15 和 16 可知,3 条路径的裂纹损伤信号与有限元仿真信号基本一致,裂纹反射波到达时间也非常相近。

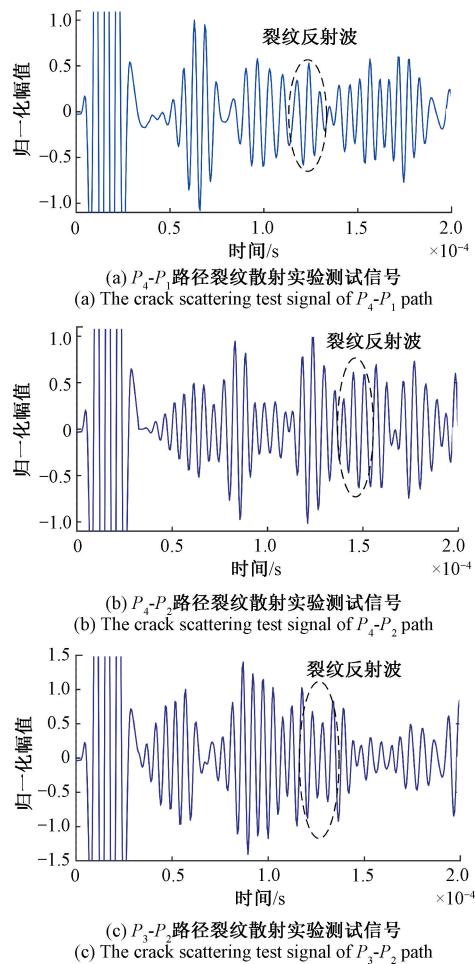


图 16 裂纹散射实验测试信号

Fig. 16 The test signals of the scattering wave from the crack

表 1 裂纹反射波到达时间

Table 1 The arrival time results of crack reflection wave

μs

传感路径	仿真	理论	实验
$P_4 \sim P_1$	116	116	110
$P_4 \sim P_2$	143	145	142
$P_3 \sim P_2$	127	128	126

## 4 结 论

本文实验研究了 0~3 型 PZT/环氧树脂复合材料力学性能及其对导波的传感特性,研究表明该压电复合材料具有良好的柔韧性,小应变工作量程内材料弹性模量约为 6.31 MPa;具有良好的线性灵敏度,在 5°C~75°C 温度范围内均能够有效检测到导波信号,能够适应于野外钢轨裂纹的长期监测。

应用研制的 PZT/环氧树脂压电复合材料传感器检

测钢轨导波信号,结合有限元仿真和实验测试,分析了钢轨激励导波特性及其裂纹损伤波到达时间。分析结果表明,不同传感路径有限元仿真和实验信号的裂纹反射波到达时间基本一致,这说明该传感器能够应用于钢轨裂纹导波信号检测,将为钢轨裂纹长期在线监测提供新型的柔性压电传感技术。

由于压电复合材料传感器对导波的响应幅值随温度变化而变化,后续将采用不同的聚合物基体材料来降低其温度敏感性;考虑到钢轨为复杂且不规则截面的三维结构,进一步分析钢轨中激励导波的模态类型、导波在钢轨中不同部位传播时的模态转换特性,结合传感器阵列技术来实现钢轨裂纹定量识别。

## 参考文献

- [1] 田贵云,高斌,高运来,等.铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1763-1780.
- TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1763-1780.
- [2] 张辉,宋雅男,王耀南,等.钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J].仪器仪表学报,2019,40(2):11-25.
- ZHAG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (2): 11-25.
- [3] 许西宁,郭保青,余祖俊,等.半解析有限元法求解钢轨中超声导波频散曲线[J].仪器仪表学报,2014,35(10):2392-2398.
- XU X N, GUO B Q, YU Z J, et al. Semi-analytical finite element method for calculating dispersion curves of ultrasonic guided waves in a rail [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (10): 2392-2398.
- [4] 卢超,刘芮辰,常俊杰.钢轨垂直振动模态的导波频散曲线、波结构及应用[J].振动工程学报,2014,27(4):598-604.
- LU CH, LIU R CH, CHANG J J. Guided waves dispersion curves and wave structures of the rail's vertically vibrating modes and their application [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27 (4): 598-604.
- [5] 胡剑虹,唐志峰,蒋金洲,等.基于 SAFE 方法的钢轨梳状传感器激励特定模态导波研究[J].中国铁道科学,2017,38(1):37-42.
- HU J H, TANG ZH F, JIANG J ZH, et al. Research on excitation of a particular mode guided wave in rail by comb transducer based on SAFE method [J]. China Railway Science, 2017, 38 (1): 37-42.

- [ 6 ] SPADA A, CAPRIOTTI M, LANZA DI SCALEA F. Global-local model for three-dimensional guided wave scattering with application to rail flaw detection [ J ]. Structural Health Monitoring, 2021; 14759217211000863.
- [ 7 ] ROSE J L, CHO Y. A guided wave approach to defect detection under shelling in rail [ J ]. NDT & E International, 2009, 42 ( 3 ): 174-180.
- [ 8 ] ZHOU C, ZHANG C, SU Z, et al. Health monitoring of rail structures using guided waves and three-dimensional diagnostic imaging [ J ]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24 ( 9 ): e1966.
- [ 9 ] HANNER K, SAFARI A, NEWNHAM R, et al. Thin film 0-3 polymer/piezoelectric ceramic composites: Piezoelectric paints [ J ]. Ferroelectrics, 1989, 100 ( 1 ): 255-260.
- [ 10 ] 张洪涛, 李波. PZT/环氧树脂0—3型压电复合材料性能的研究 [ J ]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1998, 34 ( 3 ): 48-51.  
ZHANG H T, LI B. The study of piezoelectric properties for PZT/epoxy resin 0-3 composites [ J ]. Journal of Lanzhou University ( Natural Science ), 1998, 34 ( 3 ): 48-51.
- [ 11 ] EGUSA S, IWASAWA N. Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities [ J ]. Smart Materials and Structures, 1998, 7 ( 4 ): 438.
- [ 12 ] ZHANG Y. In situ fatigue crack detection using piezoelectric paint sensor [ J ]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17 ( 10 ): 843-852.
- [ 13 ] HALE J. Piezoelectric paint: Thick-film sensors for structural monitoring of shock and vibration [ C ]. ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2004: 599-604.
- [ 14 ] YANG C, FRITZEN C P. Piezoelectric paint: Characterization for further applications [ J ]. Smart Materials and Structures, 2012, 21 ( 4 ): 045017.
- [ 15 ] KANG S H, KANG L H, KANG S H, et al. Development of wireless bird collision monitoring system using 0-3 piezoelectric composite sensor on wind turbine blades [ J ]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017; 1045389X17730925.
- [ 16 ] YOO B, PUREKAR A S, ZHANG Y, et al. Piezoelectric-paint-based two-dimensional phased sensor arrays for structural health monitoring of thin panels [ J ]. Smart Materials and Structures, 2010, 19 ( 7 ): 075017.
- [ 17 ] 杨照光, 张涛允, 温定筠, 等. 基于0-3型压电复合材料的声发射传感器的研制 [ J ]. 电子元件与材料, 2014, 33 ( 6 ): 69-71.  
YANG ZH G, ZHANG T Y, WEN D J, et al. Development of acoustic emission sensors based on the 0-3 PZT/P ( VDF-TFE ) piezoelectric composite [ J ]. Electron Compon Mater, 2014, 33 ( 6 ): 69-71.
- [ 18 ] 沈意平, 刘缘, 王钢, 等. 基于Lamb波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料传感器制备及应用 [ J ]. 仪器仪表学报, 2019, 40 ( 12 ): 19-25.  
SHEN Y P, LIU Y, WANG G, et al. Preparation and application of piezoelectric ceramic/epoxy resin composite sensor based on Lamb wave [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 ( 12 ): 19-25.
- [ 19 ] RAGHAVAN A, CESNIK C. Modeling of piezoelectric-based Lamb wave generation and sensing for structural health monitoring [ J ]. Smart Structures and Materials, 2004, 5391: 419-430.
- [ 20 ] LANZA DI SCALEA F, MATT H, BARTOLI I. The response of rectangular piezoelectric sensors to Rayleigh and Lamb ultrasonic waves [ J ]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121 ( 1 ): 175-187.
- [ 21 ] SCHUBERT K J, HERRMANN A S. On attenuation and measurement of Lamb waves in viscoelastic composites [ J ]. Composite Structures, 2011, 94 ( 1 ): 177-185.
- [ 22 ] 王送来, 吴万荣, 沈意平, 等. 基于压电纤维传感器Lamb波方向检测的裂纹识别方法 [ J ]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51 ( 10 ): 2739-2748.  
WANG S L, WU W R, SHEN Y P, et al. Crack localization with directional piezoelectric fiber sensors based on Lamb wave [ J ]. Journal of Central South University ( Science and Technology ), 2020, 51 ( 10 ): 2739-2748.

### 作者简介



沈意平(通信作者),2003年于湖南科技大学获得学士学位,2006年于湖南科技大学获得硕士学位,2014年于华中科技大学获得博士学位,现为湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室教授,博士生导师,主要研究方向为新型压电传感技术、结构健康监测。

E-mail: yiping1011@163.com

**Shen Yiping** (Corresponding author) received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Hunan University of Science and Technology in 2003 and 2006, and received her Ph.D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2014. She is currently a professor at Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology. Her main research interests include piezoelectric sensing technology, and structure health monitoring.