

# 采用压电陶瓷检测预应力管道灌浆质量方法

张柳煜, 申超强, 何江波

(长安大学公路学院 西安, 710064)

**摘要** 为解决预应力波纹管内灌浆密实度的快速检测难题,提出一种基于压电陶瓷(piezoelectric ceramic, 简称 PZT)的灌浆密实度检测方法。首先,在波纹管底部粘贴 PZT 传感器作为信号发射端,在上半部不同位置粘贴共 3 个 PZT 传感器作为信号接收端;其次,试件由粘有传感器的波纹管、钢绞线、灌浆管道和外侧混凝土共同组成,并设置 6 种工况:灌浆 0%、50%、80%、100%、灌浆 50% 存在水层、灌浆 80% 存在水层;最后,通过数值模拟分析信号在结构内的传播过程,利用时域分析法和小波包能量分析法对实验中接收到的信号进行处理。结果表明:不同灌浆程度会改变信号的传播路径。当灌浆程度到达接收端传感器位置或管道内部存在水层时,传感器接收到的信号能量会明显增加。随着灌浆程度的增加,提出的基于小波包能量的损伤指数逐渐变小并趋于 0。此外,通过反向传播神经网络构建灌浆程度识别系统,识别准确度达到 100%,验证了所提检测方法对预应力孔道灌浆密实度检测的有效性。

**关键词** 管道灌浆;压电陶瓷;小波包能量;数值模拟;损伤指数;损伤识别

**中图分类号** TH878;TU378

## 引言

近年来,预应力混凝土结构在国内外桥梁建设中得到了广泛应用,其中预应力孔道灌浆是后张法预应力桥梁建设的重要步骤之一。然而,由于施工工艺、材料以及外界环境的影响,导致灌浆不密实的情况频频发生<sup>[1]</sup>。因此,如何高效、快速地检测灌浆密实度成为亟待解决的问题。

现有的预应力孔道灌浆检测方法主要为钻芯取样法、探地雷达法、超声波检测法以及冲击弹性波法等<sup>[2-4]</sup>。其中,钻芯取样法会破坏结构,对结构造成永久性损伤,且检测速度慢,不适合大范围检测<sup>[5]</sup>。探地雷达法对金属波纹管的检测效果不佳,且钢筋对检测结果准确性影响较大,难以对缺陷病害进行更加具体的量化<sup>[5-6]</sup>。超声波检测法发射的信号波长短、频率高,在混凝土结构中损耗快,因而检测范围较小,不适用于孔道灌浆等含多种材料的检测。同时,超声波检测法价格昂贵,检测效率较低<sup>[7]</sup>。冲击弹性波法则是通过对信号的数据处理来辨别灌浆缺陷,但所需仪器价格昂贵,且难以快速对缺陷位置进行定位与定量分析,对于大体积构件的定量分析效率较低<sup>[8]</sup>。

随着智能材料的不断发展,桥梁健康状况检测技术也取得了显著进步。压电陶瓷(piezoelectric ce-

ramic, 简称 PZT)具备响应迅速、频响范围广、成本低廉以及便于加工成型等优势,既可作为驱动器,也可作为接收器,在土木工程领域的无损检测和健康监测中有着广阔的应用前景。Chen 等<sup>[9]</sup>基于 PZT 超声检测方法,对钢管混凝土骨料离析进行数值模拟,结果表明,PZT 传感器接收到的信号受钢管混凝土内部骨料离析程度的影响。张端<sup>[10]</sup>提出了基于压电智能传感技术的钢结构节点连接健康监测方法,对钢结构在安装和使用过程中出现的螺栓松动和裂纹扩展进行了监测。

当前研究对于灌浆缺陷处均采用空气进行模拟,而由于不当的施工工艺,实际工程中会导致灌浆料在孔道内发生离析,出现泌水现象,致使孔道内部上方出现水层。本研究采用粘贴式 PZT 传感器,对预应力孔道灌浆质量进行数值模拟与实验研究,设计不同灌浆程度以及出现水层等 6 种工况。通过数值模拟,分析不同工况下信号在结构内的传播情况,并通过实验研究分析对比不同工况下响应信号的特征。提出基于小波包能量的损伤指数(damage index, 简称 DI),验证采用 PZT 检测预应力孔道灌浆质量方法的可行性。并通过反向传播(back propagation, 简称 BP)神经网络,构建预应力管道灌浆质量识别系统,进一步推动该检测方法在实际工程中的应用。

# 1 原理分析

通过 PZT 正、逆压电效应的驱动和传感功能对管道灌浆质量进行检测,利用 PZT 与待测结构的机电耦合效应,在主动健康监测系统下实现电信号和机械振动信号的相互转变。在压电驱动器终端输入特定电压信号函数,将电信号转变成机械振动信号,并以应力波的形式在结构内传播。应力波传播到传感器处使其产生机械变形,继而将具有能量特性的机械振动信号转变为电信号<sup>[11]</sup>。当传播过程的介质发生变化时,应力波发生畸变,导致接受到的信号发生变化。

笔者利用 COMSOL 多物理场仿真软件对预应力管道不同灌浆程度进行模拟,分析不同工况下信号传播过程。在数值模拟指导下,进行预应力管道灌浆检测实验研究,采用时域分析法和小波包能量分析法对传感器接收的信号进行处理。

## 1.1 模型建立

本研究主要聚焦于预应力管道横断面灌浆程度的检测,因此本模型中不考虑长度因素的影响,PZT 检测的二维有限元模型如图 1 所示。

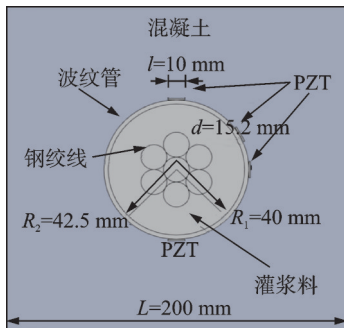


图 1 PZT 检测的二维有限元模型

Fig.1 Two-dimensional finite element model for PZT detection

基于固体力学模块对材料力学属性以及力学边界条件进行定义,利用压力声学对信号在水层中的传播进行定义。对波纹管底部 PZT 传感器设置电压激励信号,选用幅值为 10 V 的正弦扫频信号为

$$V(t) = \begin{cases} 10 \sin\left(2\left(f_0 + \frac{f_1 t}{n}\right)\pi t\right) & (0 \leq t < n) \\ 0 & (t \geq n) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $n$  为激励信号持续时间,取 250  $\mu\text{s}$ ;  $f_0$  为扫频信号下限,为 100 Hz;  $f_1$  为扫频信号上限,为 100 kHz。

扫频激励信号如图 2 所示。波速  $c$ 、波长  $\lambda$  和频率  $f$  的关系式为  $c = \lambda f$ ,波速取在混凝土中的声速,通过波速和频率可以求得波长。网格大小要保证最

小波长至少通过 10 个单元格<sup>[12]</sup>,本研究以  $\lambda/20$  作为网格划分的最小尺寸。同时,在外侧混凝土边界处设置低反射边界,减小信号反射影响。分析步长取信号最小周期的 1/10,为 1  $\mu\text{s}$ ,总分析时间为 300  $\mu\text{s}$ 。

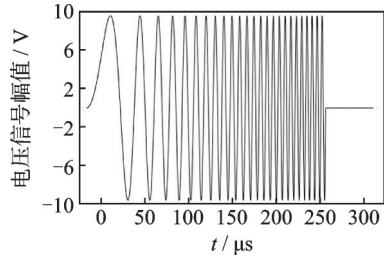


图 2 扫频激励信号

Fig.2 Sweep excitation signal

通过弹性模量  $E$ 、密度  $\rho$  和泊松比  $\mu$  对外侧混凝土、波纹管、钢绞线和灌浆料的材料属性进行定义,材料参数如表 1 所示。通过密度、弹性矩阵、应力常数矩阵以及相对介电常数对 PZT-5H 片进行定义,在波纹管底端布置 PZT 片作为驱动端,在波纹管壁上上部不同高度布置 3 个 PZT 片作为接收端。

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$
混凝土	33.5	2 400	0.20
波纹管	2.7	1 380	0.38
钢绞线	206.0	7 850	0.30
灌浆料	15.8	2 000	0.18

为保障模拟精确度,在 COMSOL 中导入静电模块,对 PZT 片 2 个电极进行定义,准确模拟 PZT 驱动器分别作为接地端和输入电压信号端的 2 个表面,PZT 驱动器电压信号设置图如图 3 所示。

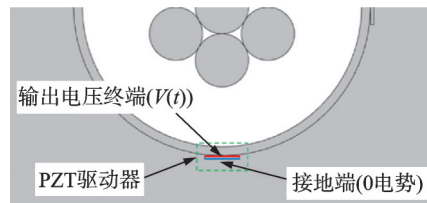


图 3 PZT 驱动器电压信号设置图

Fig.3 Setting diagram of PZT driver voltage signal

## 1.2 信号传播过程分析

通过分析结构内部应力变化模拟信号传播,模型分别设置灌浆 0%、灌浆 50%、灌浆 50% 且存在水、灌浆 80%、灌浆 80% 且存在水和灌浆 100% 共 6 种工况。分别提取其中 150 与 250  $\mu\text{s}$  时刻的结构内部应力分布图进行分析,不同工况各时刻应力分布图如图 4 所示。

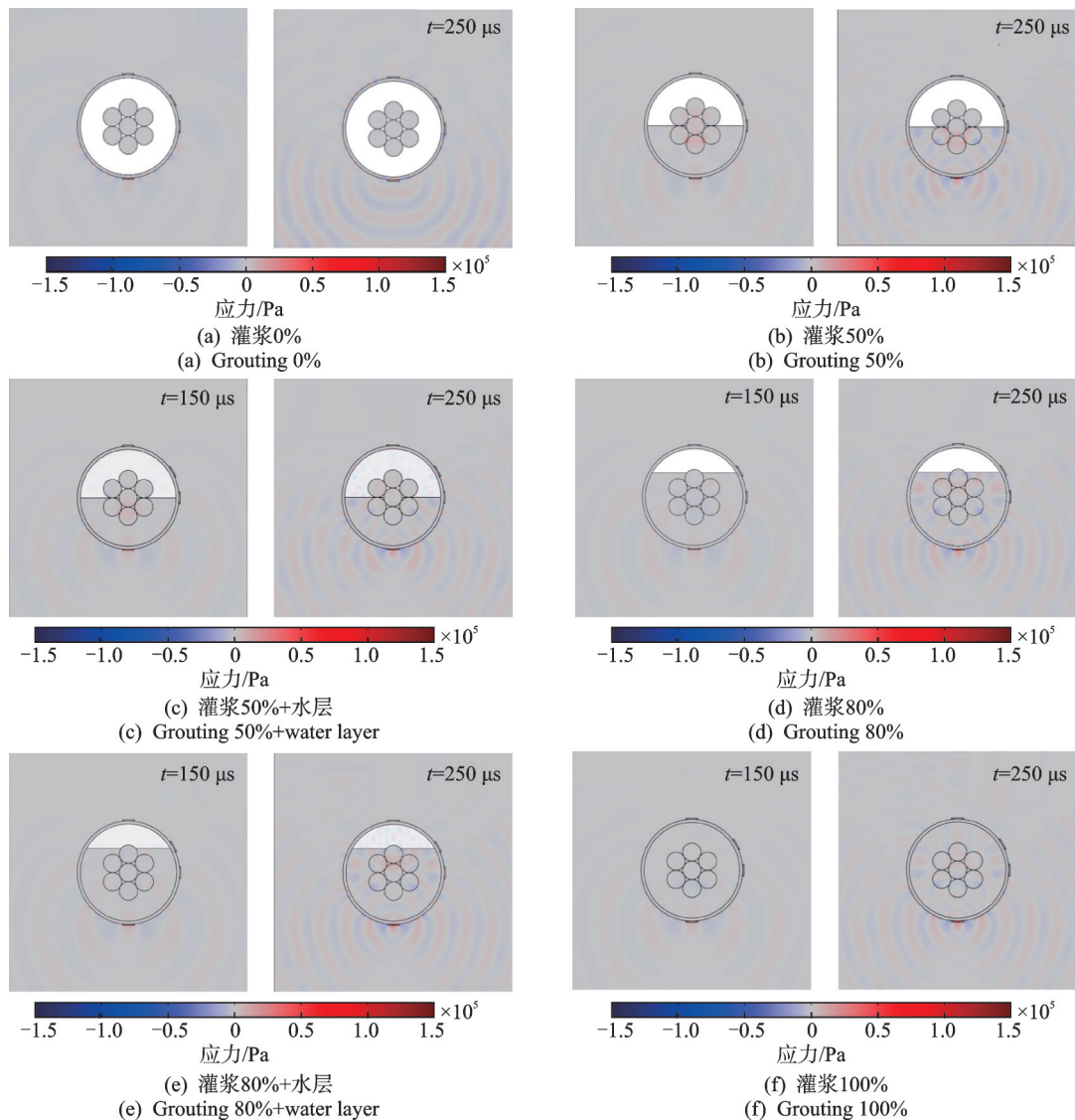


图4 不同工况各时刻应力分布图

Fig.4 Stress distribution diagrams at different time points under different working conditions

在不同工况下,通过给予波纹管底部PZT传感器电压激励信号产生应力波,在结构内部经由不同介质传播到接收端PZT传感器。图4(a)中,当灌浆程度为0%时,由于内部缺陷,应力波需通过波纹管进行传播,传播途径较长。随着灌浆程度增加至50%、80%和100%,应力波可通过管道内部灌浆料直接传播到对应PZT传感器,传播途径相对变短,在接收端传感器处应力相对变大。不同的灌浆程度改变了结构截面形式,影响了信号的传播路径。当管道内部出现水层时,由图4(c)和(e)可以看出,一部分信号可通过水层传播到PZT传感器。因此,在利用PZT传感器进行检测时,要考虑水层对信号的影响。分析可知,管道内部结构的变化会使信号传播路径发生改变,从而导致PZT传感器接收到的信号相应发生改变,这说明采用PZT传感器对预应力

管道灌浆质量检测具有一定可行性。

## 2 实验设计

### 2.1 试件设计

采用基于PZT的主动健康检测法,模拟预应力梁中单个管道灌浆密度检测过程,实验模型选用带有预应力管道的混凝土构件,构件组成部分包括预应力波纹管、钢绞线、PZT传感器、灌浆孔道以及外侧包裹的混凝土等,模型构件尺寸参数见表2。

为更好地与待测结构贴合,传感器采用翻转电极,即正、负极在同一面,图5为PZT片实物图。为避免阻尼对结果造成影响,首先,用丙酮清洁PZT片表面,去除阴极氧化膜,以保证传感器具有良好的电荷传输功能。待PZT片表面干燥后焊接导线,焊



表 2 模型构件尺寸参数

Tab.2 Model component size parameters

材料	尺寸/mm
实验试件	200×200×300
波纹管	内径 $\varnothing$ 80、壁厚 2.5
钢绞线	直径 $\varnothing$ 15.2
PZT-5H	直径 $\varnothing$ 10、厚 0.7

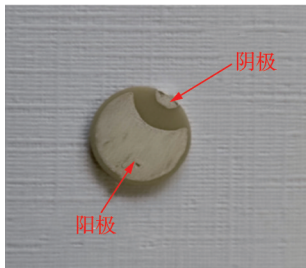


图 5 PZT 实物图

Fig.5 Physical drawing of PZT slice

点尽量小且平整,位置靠近 PZT 片边缘。然后,打磨平整后,使用强力胶将 PZT 片粘贴到波纹管表面预定位置,再用蜡层和有机硅密封胶对 PZT 片进行防水绝缘处理。最后,使用绝缘胶带进行固定和保护,粘贴式 PZT 传感器如图 6 所示。粘好 PZT 片后,在波纹管两侧粘贴带孔的透明亚克力板,既可固定钢绞线,也可观察到管道内灌浆程度。

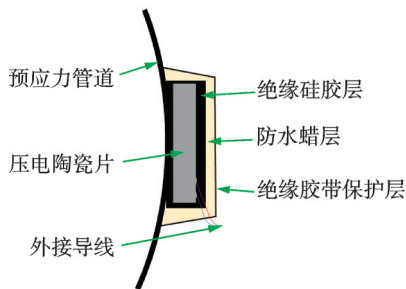


图 6 粘贴式 PZT 传感器

Fig.6 Adhesive PZT sensor

为保障在波纹管外侧浇筑混凝土后可以输入灌浆料,在波纹管上预留直径 $\varnothing$ 20 mm 的小孔道并连接管道延伸至混凝土外。在波纹管底部粘贴 PZT 传感器作为信号发射端,编号为 PZT-o;在波纹管中间位置、距波纹管底部 60 mm 处以及波纹管顶部分别布置 PZT 传感器,用于接受信号,编号分别为 PZT-a、PZT-b 和 PZT-c,试件构造及尺寸如图 7 所示。

考虑到实际工程中可能出现的情况,笔者对缺陷处工况进行细化,并对缺陷处存在水层的情况进行模拟,共设置 6 个工况。模拟中假设水层均到达管道顶端,实验工况设计图如图 8 所示。

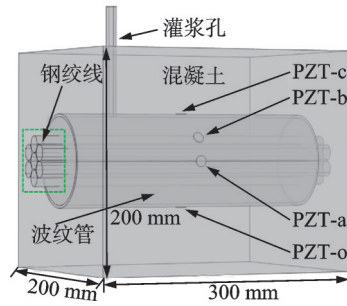


图 7 试件构造及尺寸

Fig.7 Specimen structure and dimensions

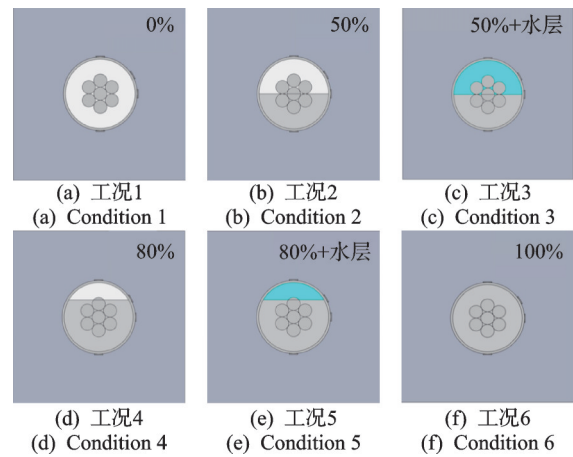


图 8 实验工况设计图

Fig.8 Design diagrams of test conditions

实验中各工况灌浆程度通过计算灌浆料质量控制,浇筑后的实验结构如图 9 所示。通过灌浆料水料比计算灌浆料的平均密度 $\rho$ ,实际所需灌浆质量 $m_x$ 为

$$m_x = \rho Qx \quad (2)$$

其中: $m_x$ 为 $x$ 灌浆程度下所需的灌浆质量; $Q$ 为波纹管管道体积。



图 9 浇筑后的实验结构

Fig.9 Experimental structure after concrete placement

## 2.2 信号采集

测试设备为 NI USB-6366 数据采集卡,用 USB 数据线与电脑连接,采集卡 AO 端与实验试件 PZT-o 连接,AI 端与接收端传感器 PZT-a、b、c 连接。通过 LabVIEW 软件输入指定激励电压信号,经过数据采集卡将信号施加到 PZT-o,信号经过实

验试件传递到 PZT-a、b、c 传感器,再由采集卡收集到电脑显示存储分析。按照图 8 中工况顺序依次对试件进行检测,检测原理如图 10 所示。

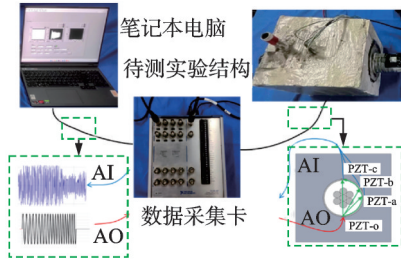


图 10 检测原理图

Fig.10 Principle of the detection process

### 3 实验结果分析

#### 3.1 时域分析

信号强弱可以通过时域幅值这一关键参数来表征。当孔道灌浆存在缺陷时,信号在结构内部的传播会受到影响,进而引发信号幅值发生变化,因此通过分析信号时域幅值的变化可间接推断孔道灌浆的缺陷情况。采集并保存 PZT-a、b、c 传感器在不同工况下接收到的电压信号数据,通过 Matlab 软件分析,不同工况传感器 PZT-a、b、c 接收信号时域分析图如图 11 所示。

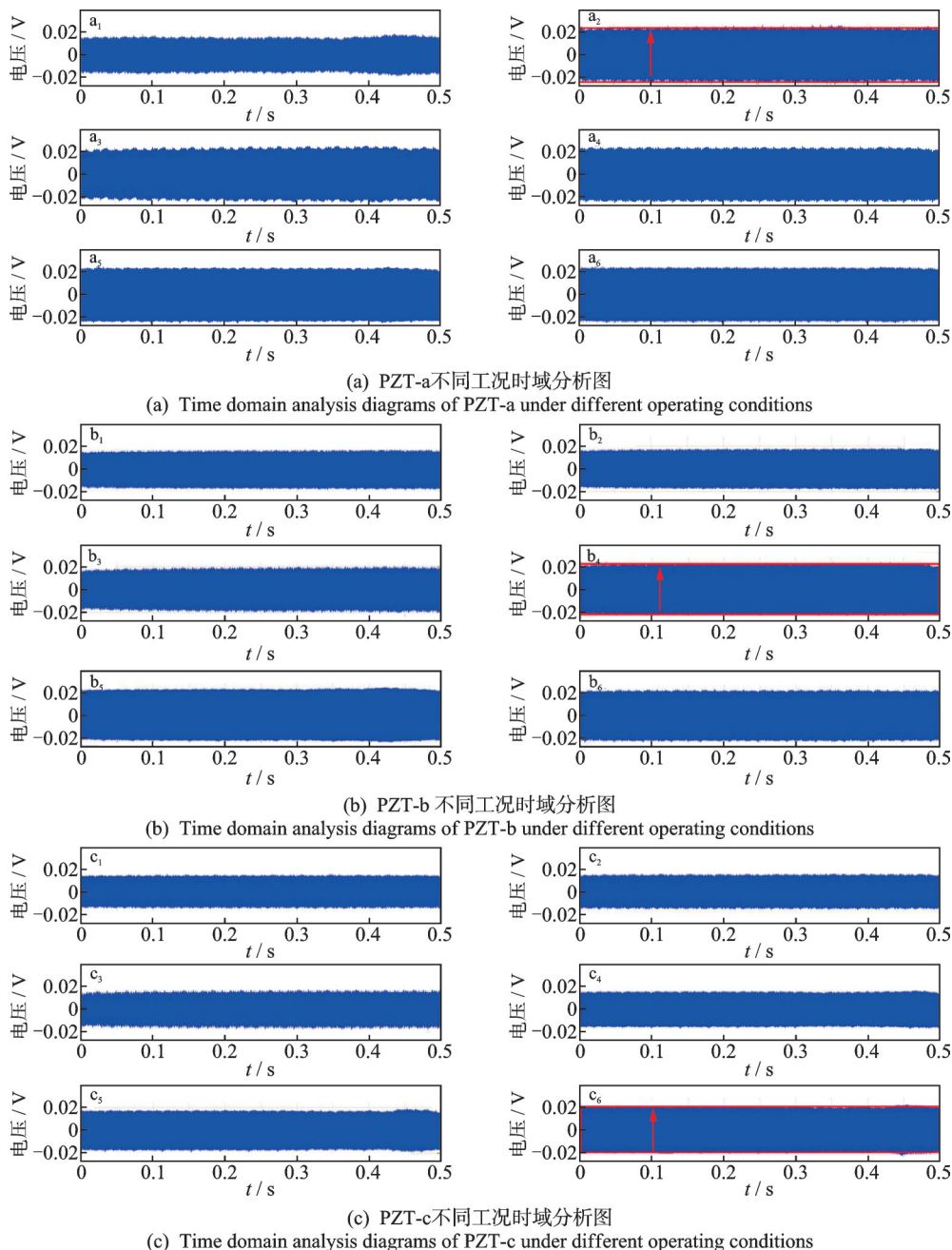


图 11 不同工况传感器 PZT-a、b、c 接收信号时域分析图

Fig.11 Time domain analysis of signals received by sensors PZT-a, b, and c under different operating conditions

分析可知,当灌浆程度为0%时,PZT-a、b、c仍能接收到一定的电压信号。由图 11(a)可知,当灌浆程度到达50%时,PZT-a接收到的电压信号幅值明显增大。在出现水层以及继续添加灌浆料的工况中,PZT-a接收到的电压信号幅值变化并不明显,且基本趋于稳定。由图 11(b)、(c)可知,当灌浆程度到达80%、100%时,传感器 PZT-b、c接收到的电压信号幅值均较前几种工况明显增大。这说明当灌浆程度达到传感器所在位置时,信号可直接通过灌浆料传递到PZT接收端,从而使信号幅值变大。当管道内出现水层时,通过时域分析难以看出明显变化,须采取其他方法进一步进行分析。

### 3.2 小波包能量分析

能量是损伤识别中的一项重要考量指标,为进一步分析不同工况下响应信号的分布规律,笔者利用 Matlab 软件对接收到的信号进行小波包分解<sup>[13]</sup>。在激励信号作用下,改变结构内灌浆程度会引起信号传播发生变化,某些频率被抑制,另一些频率则得到增强。小波包分解后,某一个或某几个频带必然会发生能量增减,根据这些能量增减可判断结构内部的灌浆情况<sup>[14]</sup>。利用小波包能量分析法对不同灌浆工况下的响应信号进行分析,可得到信号在各个工况下的能量分布情况。

笔者选用3层小波包分解对信号进行分析,以PZT-c传感器在灌浆50%工况下接收到的信号为例,每一级信号均对低频和高频进行分解,表3为小波包分解能量比例。分解后的小波包信号能量集中分布在第一个分解集,占比95.11%,这说明接收的信号能量主要集中在低频。由此可以得出,在信号传递过程中,若传播介质发生变化,将导致信号波的能量发生衰减。低频信号波长较长,能轻松越过波纹管到达接收器。高频信号波长较短,在传播过程中须经过波纹管内部,在灌浆程度不足时会产生较大的能量损失,故而接收到的信号主要以低频为主。由此可得,在损伤检测中,通过低频信号难以推断波纹管内灌浆程度,低频信号对损伤不敏感,因而损伤检测主要依赖高频信号。

图 12 为不同工况 PZT-a、b、c 小波包能量分析。结合上文分析与图 12,在0%灌浆情况下,信号以散射或衍射的方式通过波纹管和外侧混凝土传播到接收器。在此过程中,高频信号能量损耗较大,而低频信号由于其波长较长则基本不受影响,相应接收器仍能捕获一部分信号能量。当灌浆程度达到

表 3 小波包分解能量比例

Tab.3 Energy ratio of wavelet packet decomposition %

0层	1层	2层	3层	频率
100	98.72	97.47	95.11	低
			2.36	高
100	1.28	1.25	0.87	低
			0.38	高
100	1.28	0.19	0.08	低
			0.11	高
100	1.28	1.09	0.92	低
			0.17	高

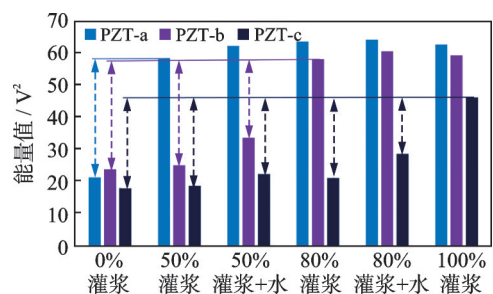


图 12 不同工况 PZT-a、b、c 小波包能量分析

Fig.12 Wavelet packet power analysis of PZT-a, b and c under different working conditions

50%时,信号可直接通过管道内灌浆料进行传播。在传播过程中高频信号能量损耗变小,PZT-a接收到的信号能量骤增,比0%灌浆工况的能量增加174%,而PZT-b和PZT-c接收到的能量无明显变化。当灌浆程度达到80%和100%时,PZT-b和PZT-c接收到的信号能量相应提高,分别增加了73%和61%,PZT-a接收到的能量出现小幅度波动,但基本趋于稳定。

当灌浆50%且存在水层时,PZT-a接收到的信号能量变化并不明显,而PZT-b和PZT-c接收到的能量相较没有水层的情况分别增加了34%、35%,说明部分信号可通过水层传播到传感器。信号通过水层传播减小了能量损耗,但能量值仍小于灌浆密实情况下接收到的能量值;在灌浆80%且存在水层时,PZT-c接收到的能量也有一定增加,说明管道内存在水层对信号传递有一定的影响,减小了部分高频信号的能量损耗。

通过分析可以得出,当信号传播到灌浆不密实处时,由于内部结构和传播介质的变化,高频信号难以直接传播到传感器,造成接收到的信号能量减小。综上,通过实验验证了所提出的检测方法对预应力管道密实性检测的可行性和有效性。



### 3.3 DI分析

为更加直观地反应出不同工况下信号情况,定义评价预应力管道灌浆质量的无量纲DI为

$$DI = \left| \frac{E_h - E_i}{E_h} \right| \quad (3)$$

其中: $E_i$ 为第*i*个工况下信号的小波包能量, $i=1,2,\dots,6$ ;  $E_h$ 为灌浆饱满状况下信号的小波包能量。

图13为基于小波包能量的DI变化图,当管道灌浆0%时DI最大,即管道内灌浆密实性越差,DI则越趋近于1;相反,当管道内灌浆密实(100%灌浆)时DI最小。由此可知,DI随着灌浆程度的增加而下降。DI表示信号在不同灌浆工况下的能量值与健康状况下的能量值差异情况,分析得知,基于小波包能量的DI能够有效反映预应力管道内部灌浆缺陷程度。

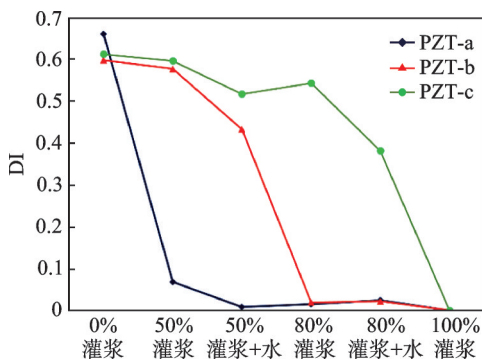


图13 基于小波包能量的DI变化图

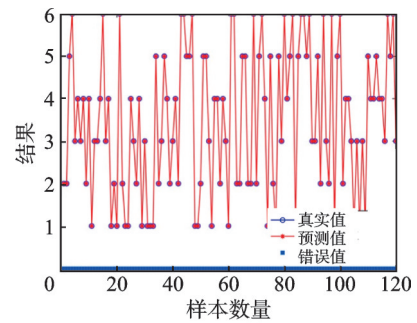
Fig.13 Variation of DI based on wavelet packet energy

### 3.4 基于BP神经网络的损伤分类结果分析

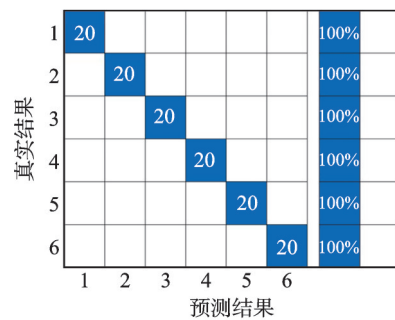
利用BP神经网络构建预应力管道灌浆质量识别系统,对不同灌浆工况下接收到的信号进行分类识别,在实际工程应用中可通过该系统快速对预应力管道的灌浆程度进行识别。在每种工况下采集100组信号数据,并以4:1的比例划分为训练样本和测试样本。对检测所得数据进行预处理,并采用各自DI作为输入层参数。

由前文实验结果可知,当波纹管内部灌浆高度低于某传感器粘贴位置时,该传感器接收到的信号能量随灌浆高度的增加而增强。而当波纹管内部灌浆高度超过某传感器位置后,该传感器接收到的信号能量不再随灌浆高度变化而发生明显改变,表现为基本保持稳定的特性。因此,通过单独PZT传感器接

收信号难以准确判断整个波纹管的灌浆程度。笔者采集3个PZT传感器接收到的信号能量,利用式(3)计算各自DI后组成一维向量。例如,工况1的DI向量为[0.659 6,0.597 0,0.611 2],以此作为输入参数判断整个波纹管内部灌浆状态。此时BP神经网络的网络结构为 $3 \times 6 \times 6$ ,图14为基于BP神经网络的损伤分类结果。



(a) 测试结果  
(a) Test results



(b) 混淆矩阵  
(b) Matrix of confusion

图14 基于BP神经网络的损伤分类结果

Fig.14 Damage classification results based on BP neural network

由图14可以看出,测试样本均能准确分类到对应工况,每种工况均能识别出20组样本,准确度达到100%。这验证了以3个PZT传感器检测所得的DI向量作为判断标准可有效识别不同灌浆工况,这一标准具有较高识别准确率。

## 4 结论

1) 灌浆程度的不同改变了结构截面形式,信号在传播过程中会绕开管道内部缺陷。灌浆程度越高,信号波在传播过程中能量损耗越少,接收端接收到的信号能量越强。当管道内存在水层时,信号能量损耗有一定减弱,但仍明显大于灌浆密实的工况。

2) 基于小波包能量的DI可表征各工况信号能量相较于灌浆密实时信号能量的衰减程度,分布于0~1之间。当灌浆程度达到或高于某传感器所处

位置时,该传感器检测出的DI均处于较低状态,接近于0。

3) 通过BP神经网络构建的预应力管道灌浆质量识别系统,可由检测信号反向推断得出检测构件的灌浆质量情况,以3个不同位置传感器接收到的信号损伤参数组成的一维向量作为判断依据具有良好的识别效果。

4) 通过实验验证了采用PZT检测预应力管道灌浆质量的可行性,但在实际工程中预应力管道内部缺陷种类繁多,且外界环境噪声也有可能对检测结果产生影响,仍需进一步研究外界因素对检测结果的量化影响。

### 参 考 文 献

- [1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [2] 辛公锋, 王兆星, 刘家海, 等. 箱梁预应力孔道压浆密实性检测技术研究[J]. 公路交通科技, 2010(增刊1): 114-117, 121.  
XIN Gongfeng, WANG Zhaoxing, LIU Jiahai, et al. Research on grouting density inspection of box girder prestressed duct[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010(suppl1): 114-117, 121.(in Chinese)
- [3] 张东风, 柳建新, 谢维. 基于支持向量机的预应力T梁压浆质量无损检测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1569-1573.  
ZHANG Dongfeng, LIU Jianxin, XIE Wei. Nondestructive testing for grouting quality in prestressed concrete T-beam based on SVM[J]. Journal of Central South University, 2010, 41(4): 1569-1573.(in Chinese)
- [4] 王智丰, 周先雁, 晏班夫, 等. 冲击回波法检测预应力束孔管道压浆质量[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 166-169, 190.  
WANG Zhifeng, ZHOU Xianyan, YAN Banfu, et al. Grout quality testing in prestressed ducts with impact-echo method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 166-169, 190.(in Chinese)
- [5] 栾健. 预应力管道灌浆质量检测的试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- [6] 陈裕权. 探地雷达法在公路隐性病害检测中的应用[J]. 大众标准化, 2022(17): 170-172.
- [7] 陈相因. 基于信号相位分析的预应力孔道压浆质量冲击回波检测分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [8] 洪越. 基于压电陶瓷的孔道压浆密实性检测试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- [9] CHEN H B, XU B, ZHOU T M, et al. Debonding detection for rectangular CFST using surface wave measurement: test and multi-physical fields numerical simulation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 238-254.
- [10] 张端. 基于压电智能传感技术的钢结构节点连接健康监测研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- [11] 庄志有. 基于外贴压电陶瓷的钢管混凝土内部缺陷检测方法研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
- [12] 李婷. 应力与材料构成对压电纵波在混凝土中的传输影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [13] 朱虹, 孙瑜, 董志强, 等. 基于压电陶瓷的灌浆套筒缺陷检测及应力传播模拟研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 117-126.  
ZHU Hong, SUN Yu, DONG Zhiqiang, et al. Research on defect detection and stress propagation simulation of grouting sleeve based on piezoelectric ceramics [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 117-126.(in Chinese)
- [14] 朱劲松, 孙雅丹. 基于小波包能量的桥梁损伤识别指标[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(4): 715-721.  
ZHU Jinsong, SUN Yadan. Wavelet packet energy based damage detection index for bridge[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4): 715-721.(in Chinese)



**第一作者简介:**张柳煜,男,1974年10月生,博士、副教授。主要研究方向为桥梁安全监测与评估技术。曾发表《Health monitoring of cuplock scaffold joint connection using piezoceramic transducers and time reversal method》(《Smart Materials and Structures》2016, Vol.25)等论文。  
E-mail:595987137@qq.com