

土体障碍物超声探测信号小波包特征分析方法

诸 岩¹, 杨立君²

(1.上海隧道工程质量检测有限公司, 上海市 201109; 2.同济大学土木工程学院, 上海市 200092)

摘 要: 利用小波包分解方法, 对土体中障碍物的超声探测信号进行分析。选用 sym8 小波基函数进行 6 层小波包分解, 并截取信号能量集中的前 16 个频带进行细致分析, 从小波包频带能量、小波包频带能量熵、小波包频带能量矩三个角度对信号进行对比。结果显示, 存在障碍物位置处信号和不存在障碍物位置处信号的小波包频带能量熵大致相等, 不能作为信号识别及障碍物判断的方法, 而小波包频带能量和小波包频带能量矩在部分频带上差异明显, 可以作为信号识别及判断的方法。

关键词: 超声波; 障碍物探测; 小波包; 能量熵; 能量矩

中图分类号: TP391

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0294-06

0 引 言

随着城市化建设的加速, 轨道交通建设变得越来越紧迫。在地铁轨道交通建设中, 盾构法施工逐渐成为主流。然而, 近年来在南方多个城市的地铁盾构施工中, 常常遇到单轴抗压强度极高的孤石。这些孤石容易导致刀盘刀具严重磨损, 并产生卡刀、斜刀、掉刀等问题^[1], 严重拖延盾构工期。此外, 这些孤石还可能引起工作面喷涌、塌方等突发地质灾害。因此, 提前探明待掘区域内孤石的赋存状态对地铁盾构工程施工过程至关重要^[2]。

超声探测是一种弹性波测试方法, 其理论基础建立在固体介质中弹性波的传播机理上^[3]。该方法通过人工激振的方式向介质发射超声波, 在一定距离上接收声波, 并分析不同介质中声波的传播速度、振幅等声学参数^[4], 解决岩土工程中的一系列问题。超声波测试已被广泛应用于地质勘察中, 例如评价岩体和土体结构特征, 测定弹性力学参数和静力学参数, 检查岩体岩面爆破和灌浆等施工质量^[5]。然而, 目前对于利用超声波探测土体中障碍物的相关研究尚不充分。因此, 开展土体中障碍物超声探测试验, 分析超声波在土体中传播特性, 具有重要的意义。

目前, 针对超声检测所采集到的数字信号, 大多只关注于时域声学参数, 包括波形、声速(声时)、幅

值等^[6], 忽视了信号频域所携带的大量信息, 故本文将侧重于更精确地分析接收信号的频率变化特征。小波分析方法是一种强大的信号处理工具, 已经成为当前的研究热点。小波分析法作为一种先进的时频分析方法, 可以对信号进行局部性能分析, 揭示其他信号分析技术难以检测到的隐藏信息^[7], 因此在土体障碍物超声检测中具有重要的应用价值。小波包分析是小波变换的一种扩展方法, 它能够弥补小波分析只对变换得到的低频成分做进一步分解, 而保留高频成分不变的缺陷, 将信号逐层分解到多个频带, 进一步分析信号的局部细节, 使其在某些小波分解系数中更加明显地凸显出来^[8]。因此, 小波包分析是土体内部障碍物检测中的一种重要工具, 可以有效地提高检测的准确性和效率。

1 小波包基本理论

小波分析是近些年来快速发展的一门新兴学科, 其理论知识深刻、实践应用广泛。小波分析是一种时间——频率分析方法, 其窗口大小固定不变但其形状在分析过程中可以改变, 具有变分辨率的特点^[9]。在分析信号的低频成分时, 其时间窗很大, 时间分辨率较低, 但频率分辨率较高; 在分析信号的高频成分时, 其时间窗很小, 频率分辨率较低, 但时间分辨率较高。这种变分辨率的特点恰好符合实际工程中信号的变化特点, 高频信号持续时间短, 低频信号持续时间长。鉴于小波分析的“自适应特性”和“数学显微镜特性”, 使其在基础科学领域和应用科学领域都得到了广泛的应用^[10]。

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 上海市数字盾构工程技术创新中心项目
(21DZ2220700)

作者简介: 诸岩(1969—), 男, 本科, 高级工程师, 从事检测科研工作。

小波包分析是一种对信号做更加精细的分析的方法,通过频带的多层次划分,实现了对多分辨率分析中没有细分的高频部分的更进一步分解。同时,小波包分析能够根据待分析信号的特征自动匹配并选择适合信号频谱的频带,从而显著提高对信号的局部分辨能力,使得小波分析在实际工程中得到了广泛的应用。

2 试验方案

2.1 试验设备

本次试验是室内模型箱试验,模型箱尺寸为 2.5 m×2.0 m×2.0 m,材质为木头,为了后续模型箱拆装便利,模型箱采用拼装式结构。试验土样选取的是上海市某地区土壤,土样性质为黏性土。障碍物选择边长为 40 cm 的混凝土立方块。超声检测设备选择北京智博联 ZBL-U5600 多通道超声测桩仪,仪器部分技术指标如表 1 所示。

表 1 ZBL-U5600 技术指标

主机参数	参数值
采集模式	同步连续快采
采样周期 /μs	0.05~409.6 多档可选
声时精度 /μs	0.05
记录长度	512~4096
发射电压 /V	65、250、500、1 000
频带宽度 /kHz	1~500
放大增益	82
增益精度 /dB	0.5
记录间距 /cm	2~25 可选

2.2 试验流程

首先,在模型箱内铺设塑料膜做防水处理,在模型箱内预先固定 5 根内径 50 mm 长 200 cm 的 PVC 管,且保证 PVC 管垂直,管口上端加塞防止杂物进入,管口下端封闭,并用密封胶作密封处理。利用 PVC 管成孔,以此作为径向换能器的探测通道。5 根 PVC 管分别编号为①至⑤号,均在模型箱短边中线上。其次,在模型箱内填入制备好的土样。对于现场采集运输回来的土样,首先进行晾晒干燥,将干燥后的土样拍碎、过筛,保证土样的均质性。填筑到模型箱中,刮平并夯实到指定高度,然后将表层用锯条刮毛,便于和上层土接触成为一体,当填筑到 40 cm 高度时,在指定位置放入混凝土试块,作为待探测的障碍物,重复上述填土步骤,直至土体高度达到 120 cm。模型箱内 PVC 管及障碍物布设位置如图 1

所示。最后进行土体中障碍物的超声探测。本次试验的测试方法采用声波跨孔测试方式,测试过程中发射探头始终与接收探头保持平行。测试开始前,先用塑料软管在 5 根 PVC 管中注满水,然后分别将发射换能器和接收换能器放入③至④、②至④、②至⑤、①至⑤管对的底部。完成仪器测试参数的设置,将测点的间距设置为 0.02 m,点击开始测试后,将两个声波换能器匀速从管底提升到管顶,即可完成整个测试过程。

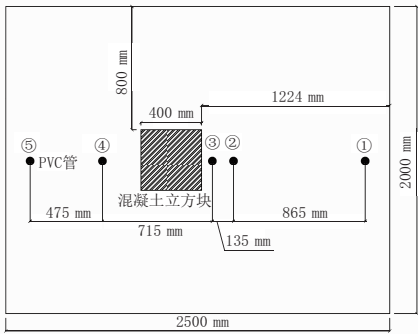


图 1 模型箱内 PVC 管及障碍物布设示意图

3 小波包特征

小波包变换是一种将原始信号分解成一系列相互正交的时频子空间(即频带)的方法。在某一层小波包分解中,可以考虑各时频子空间的小波包系数特征,包括小波包频带能量、小波包频带能量熵、小波包频带能量矩等传统小波包特征。这些特征可以用来分析信号的频域和时域特性,提取信号的局部细节信息,从而更好地理解 and 处理信号。

3.1 小波包频带能量

小波包频带能量可以反映出原始信号在不同频带上的能量分布情况,从而提供了对信号频域特性的描述^[11]。设 $S(t)$ 代表原始信号,其小波包分解后各频带信号 $S_{i,j}$ 的能量 $E_{i,j}$ 为:

$$E_{i,j} = \int |S_{i,j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |S_{i,j}(k)|^2 \tag{1}$$

式中: $S_{i,j}(k)$ 表示信号小波包分解后第 i 层第 j 节点的重构信号的离散点幅值, n 为重构信号的长度。

3.2 小波包频带能量熵

小波包频带能量熵可以反映出原始信号在不同频带上的能量分布的复杂度,在信号处理、特征提取和分类等方面有着重要的作用^[12]。当某一信号在某一频带内的能量熵越大时,意味着该信号在该频带内的能量分布更加均匀。设 $\varepsilon_k = |S_{i,j}(k)|^2 / E_{i,j}$, 则 $\sum_{k=1}^n \varepsilon_k = 1$, 其中: n 为该频带重构信号的长度。通过结合 Shannon

信息熵定理,可以计算小波包频带能量熵 $WEE_{i,j}$,其计算公式如式(2)所示。

$$WEE_{i,j} = - \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \lg \varepsilon_k \quad (2)$$

3.3 小波包频带能量矩

为了更好地描述每个分解频带内信号的能量大小及沿时间轴的分布特点,引入能量矩参数 $M_{i,j}$ 。能量矩可以反映信号在时间轴上的分布特点^[13],能量矩越大表示信号在时间轴上的分布越平稳,能量矩越小表示信号在时间轴上的分布越集中。对于原始信号小波包分解后各频带内的重构信号 $S_{i,j}$ 的能量矩 $M_{i,j}$ 为:

$$M_{i,j} = \sum_{k=1}^n k \cdot \Delta t |S_{i,j}(k)|^2 \quad (3)$$

式中: n 为频带重构信号的长度, Δt 为采样时间间隔, k 为采样点。

4 数据处理

4.1 小波包分解

随着小波分析的快速发展,许多学者构造出了一系列具有不同特性的小波基,本文选择各方面性质均良好的 sym8 小波,对信号进行小波包分解。同时,考虑到本次试验采集到的信号长度为 1 024,理论最大分解尺度为 10,但随着分解层数的增加,计算量也会随之增加。综合考虑下,本文最终选定的分解尺度为 6。

针对试验中四种探测距离,本文选择③至④、②至⑤、①至⑤的管间超声探测信号进行分析,选取深度 140 cm 处接收信号代表存在障碍物时的信号,及深度 180 cm 处接收信号代表不存在障碍物时的信号,观察两种情况下信号在不同频带上的小波包特征差异,③至④管间信号如图 2 所示,②至⑤管间信号如图 3 所示,①至⑤管间信号如图 4 所示。

4.2 小波包频带能量

(1) 小波包频带能量占比

首先,将三种管间下的两个信号小波包分解后,分别计算每一个频带的能量值,然后计算每一个频带能量在信号总能量中的比例,得到 64 个频带的能量占比,如图 5 所示。

从图中可以看出,两个位置处的信号小波包 6 层分解后,得到了 64 个子频带,信号的能量主要分布在前 16 个频带,之后的频带所占的能量几乎等于零,对信号的分析的影响可以忽略不计,故本文将重

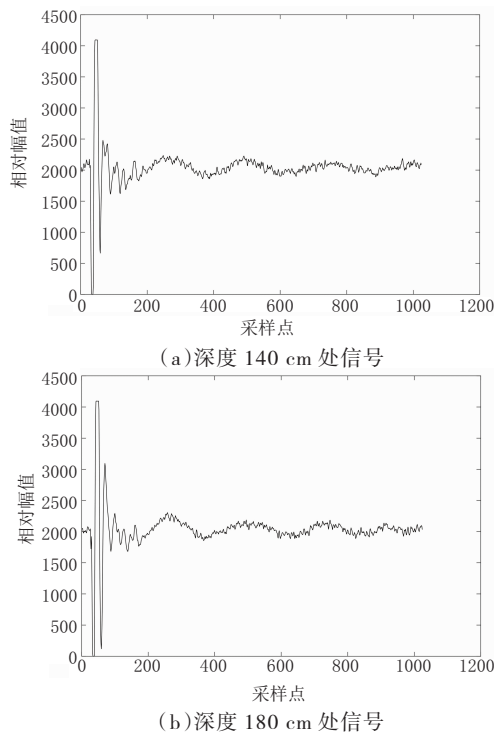


图 2 ③至④管间深度 140 cm 和深度 180 cm 信号

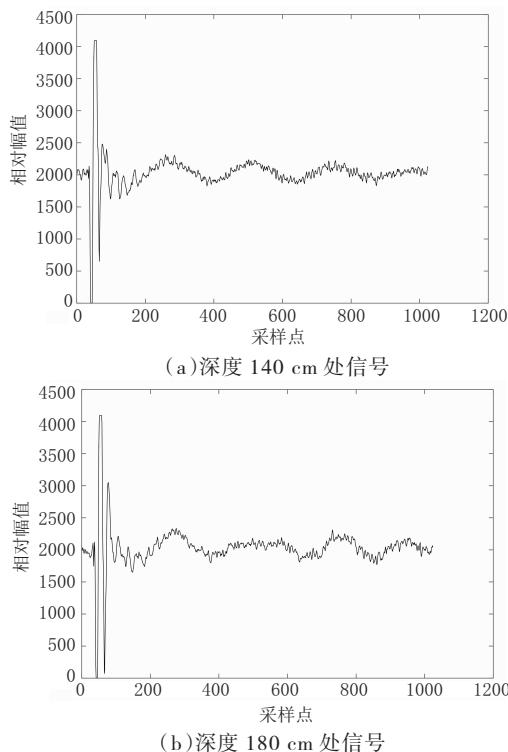


图 3 ②至⑤管间深度 140 cm 和深度 180 cm 信号

点分析信号分解后的前 16 个频带,以此观察分析两个位置处信号的差异。

在确定了重点分析的频带后,将两个信号的前 16 个频带能量占比绘制到同一个折线图中。图 6 至图 8 是三种管间下两个信号前 16 个频带的能量占比对比图。从图中可以发现,在③至④管间下,有无障碍物两种情况下信号在多个频带上能量占比差异

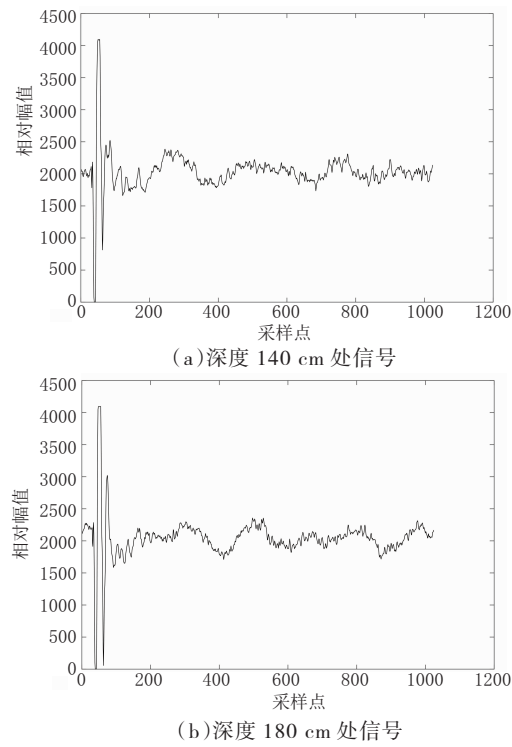


图 4 ①至⑤管间深度 140cm 和深度 180cm 信号

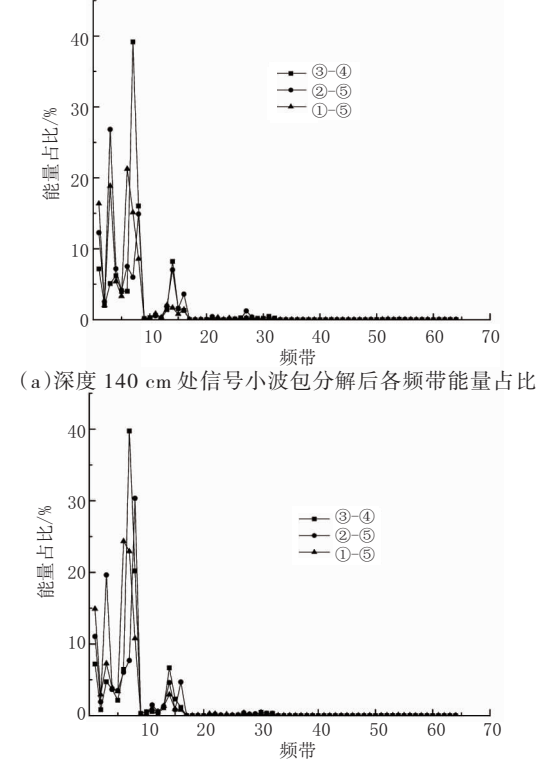


图 5 信号频带能量占比

较小,仅在频带 4、5 上存在一定差异;在②至⑤管间下,两种情况下信号同样在多个频带上的能量占比差距较小,但在频带 3、8 上差距较大,且有障碍物情况下信号在频带 8 上低于无障碍物情况,在频带 3 上高于无障碍物情况;在①至⑤管间下,两种情况下信号的差异情况与②至⑤管间相类似,在频带 3、8

上存在较大差距,且有障碍物情况下,信号在频带 8 上低于无障碍物情况,在频带 3 上高于无障碍物情况。综合可知在探测距离较小的情况下,有、无障碍物两种情况下信号的频带能量占比差异较小,而当探测距离增大时,两种情况下信号在频带 3、8 上存在较大差异,且无障碍物情况信号在频带 3 上低于有障碍物情况,在频带 8 上高于有障碍物情况,说明在探测距离较大的情况下障碍物的存在会使得频带 3、8 的能量占比变化较大,而对其余频带的能量占比影响较小,因此可通过观察这两个频带对信号进行识别。

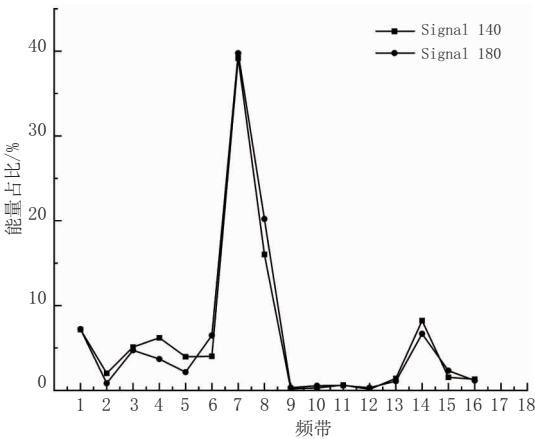


图 6 ③至④管间信号小波包分解后前 16 个频带能量占比对比图

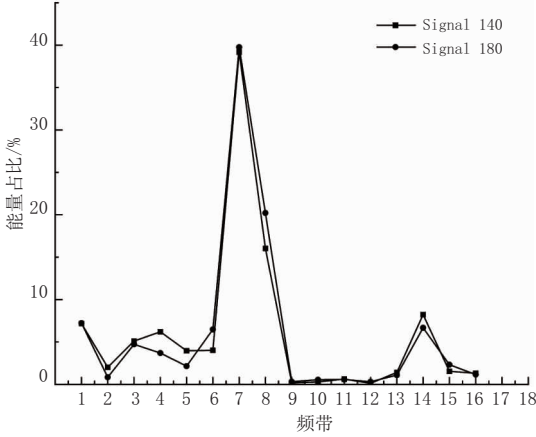


图 7 ②至⑤管间信号小波包分解后前 16 个频带能量占比对比图

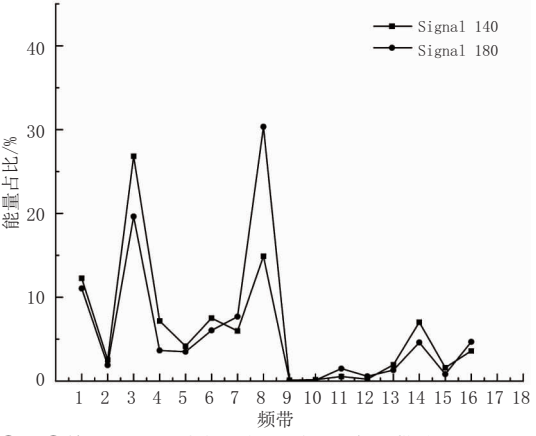


图 8 ①至⑤管间信号小波包分解后前 16 个频带能量占比对比图

(2)小波包频带能量值

对于信号的能量分析,也可以从信号小波包分解后各频带的能量值进行观察,图9至图11分别是三种管间下两个信号前16个频带的能量值对比。观察可得,③至④管间信号的能量值在多个频带上差异较小,但在频带6、7、8上无障碍物情况信号高于有障碍物情况;②至⑤管间信号的能量值在频带3、7、8上存在较大差异,且在频带7、8上无障碍物情况高于有障碍物情况;①至⑤管间信号的能量值在频带3、6、7、8上存在一定差距,且在频带6、7、8上无障碍物情况均高于有障碍物情况。由此可得,在不同的探测距离下,有无障碍物两种情况信号在频带7、8上均存在较大差距,且存在障碍物信号在这两个频带上均低于不存在障碍物信号。这表明障碍物的存在对超声接收信号的频带7、8的频率成分影响较大。

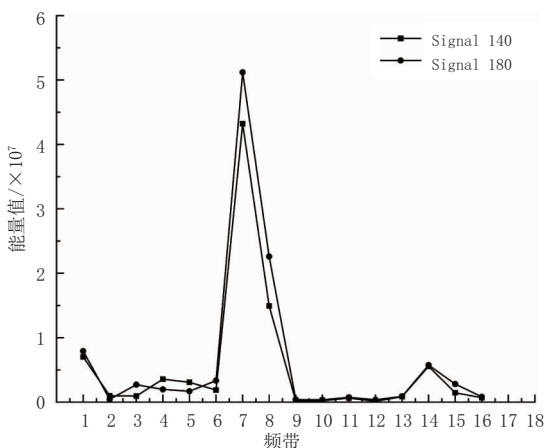


图9 ③至④管间信号小波包分解后前16个频带能量值对比图

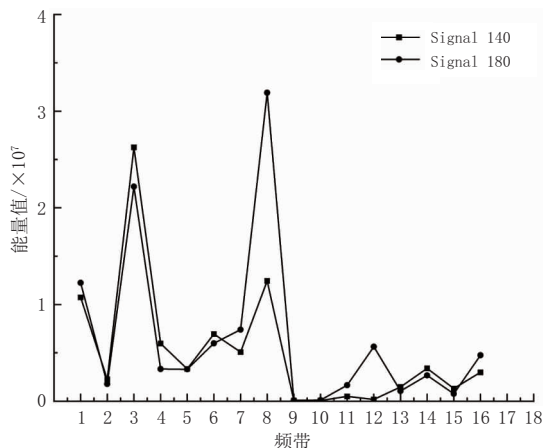


图10 ②至⑤管间信号小波包分解后前16个频带能量值对比图

综合上述信号小波包频带能量占比对比和能量值对比结果,可以发现尽管两种对比角度在某些频带上存在不同结果,但在信号能量较为集中的频带上不同距离下的结果大体一致,说明对于信号的对比,从小波包分解后频带能量角度进行分析是一种可行的频域分析方法,能够发现信号在不同频带上

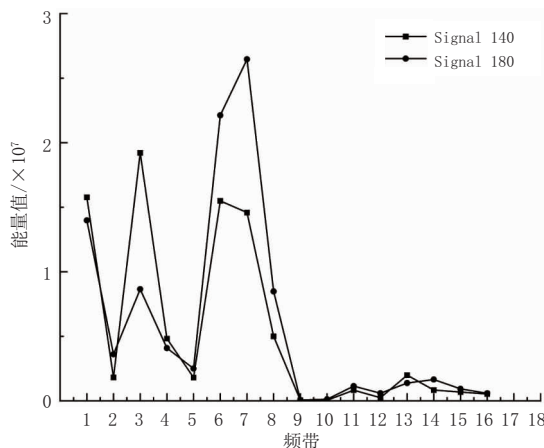


图11 ①至⑤管间信号小波包分解后前16个频带能量值对比图的差异,对信号的分类及识别有着重要意义。

4.3 小波包频带能量熵

图12至图14是三种管间下两个位置处信号小波包分解后前16个频带能量熵对比图。从图中可以看到,两个信号小波包分解后前16个频带的能量熵,大致范围为在1.5到3之间,16个频带的能量熵差异不大,说明信号小波包分解后前16个频带的能量分布的复杂性及随机性大致相同。尽管部分频带两个信号的能量熵存在一定差距,但考虑到土体的不均质性对接收信号的影响,因此信号小波包分解后频带的能量熵不能作为信号对比分析的角度。

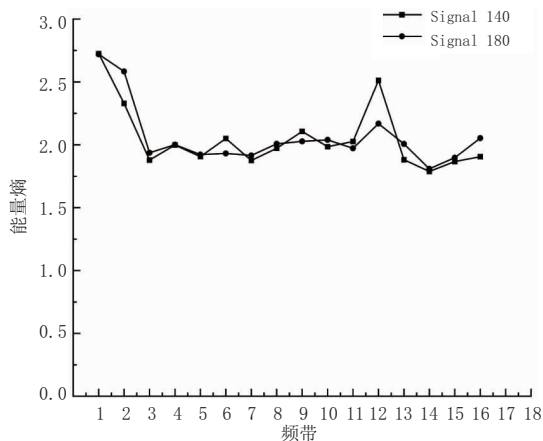


图12 ③至④管间信号小波包分解后前16个频带能量熵对比图

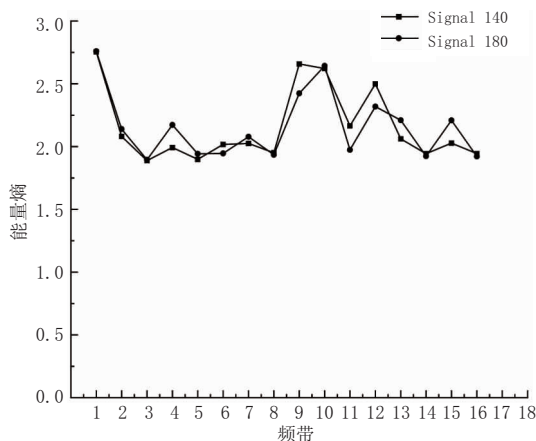


图13 ②至⑤管间信号小波包分解后前16个频带能量熵对比图

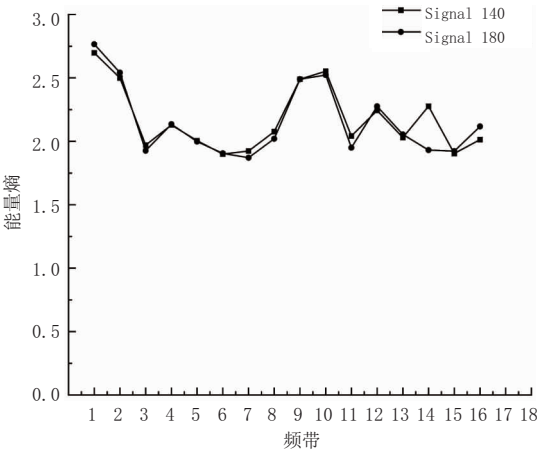


图 14 ①至⑤管间信号小波包分解后前 16 个频带能量熵对比图

4.4 小波包频带能量矩

图 15 至图 17 是三种管间下两个位置处信号小波包分解后前 16 个频带能量矩对比图。从图中可知三种管间下信号的能量矩主要集中在频带 1、7、8 上,因此重点分析不同管间下这三个频带的差异情况。③至④管间下无障碍物信号在频带 1、7、8 上均高于有障碍物信号;②至⑤管间下无障碍物信号在频带 1、7、8 上同样均高于有障碍物信号;①至⑤管间下两种情况中信号在频带 8 上几乎相等,而在频带 1、7 上无障碍物情况信号仍高于有障碍物情况信号。这表明三种探测距离下,由于障碍物的存在均导致频带 1、7、8 的能量矩减小,说明可以通过对信号进行小波包分解后计算能量矩进行信号的分析 and 识别。

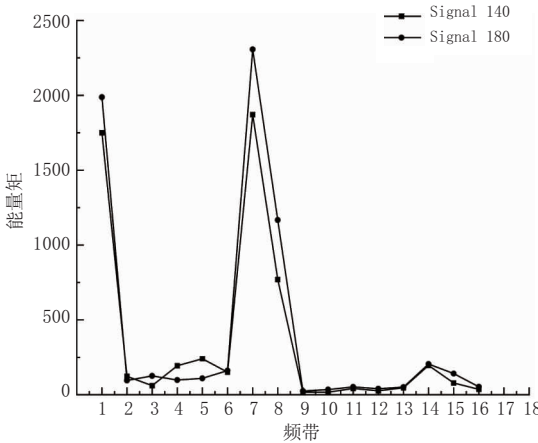


图 15 ③-④管间信号小波包分解后前 16 个频带能量矩对比图

5 结 论

本文采用小波包分解的方法对超声探测土体中障碍物的接收信号进行分析,选用 sym8 小波基函数对信号进行 6 层小波包分解,截取信号能量集中的前 16 个频带进行细致分析,从小波包频带能量、小波包频带能量熵、小波包频带能量矩三个角度对信

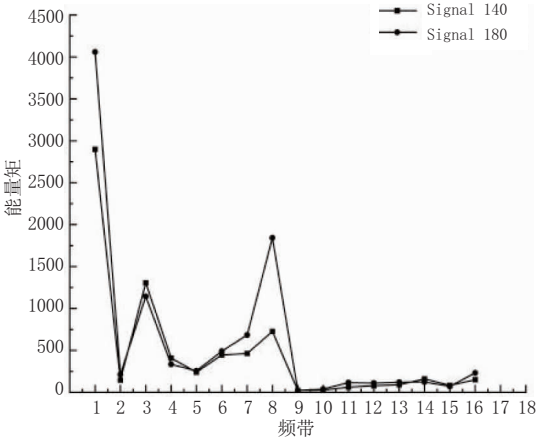


图 16 ②至⑤管间信号小波包分解后前 16 个频带能量矩对比图

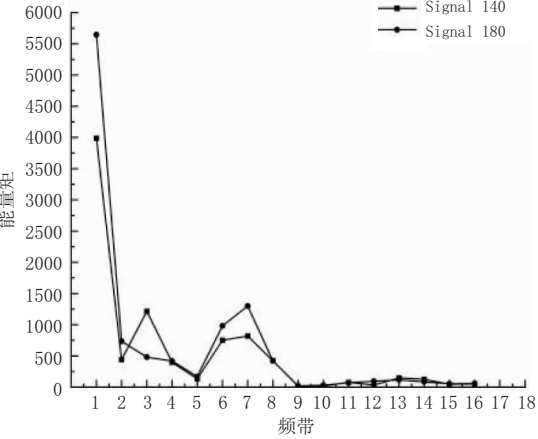


图 17 ①至⑤管间信号小波包分解后前 16 个频带能量矩对比图号进行对比。可以得到两个位置处的信号小波包频带能量和小波包频带能量矩在频带 1、频带 3、频带 7 和频带 8 上有着显著的差异,表明障碍物对这三个频带成分产生了明显影响,可以从频带能量和频带能量矩这两个角度对信号进行识别与分类;而小波包频带能量熵在前 16 个频带上结果差异较小,不能作为信号对比分析的方法。

参考文献:

[1] 黄恒儒.盾构穿越花岗岩球状风化孤石群的施工关键技术[J]. 隧道建设,2015,35(8):834-840.
[2] 李术才,刘征宇,刘斌,等.基于跨孔电阻率 CT 的地铁盾构区间孤石探测方法及物理模型试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(3):446-457.
[3] 王宇,李晓,胡瑞林,等.岩土超声波测试研究进展及应用综述[J]. 工程地质学报,2015,23(2):287-300.
[4] 密士文.混凝土中超声波传播机理及预应力管道压浆质量检测方法研究[D].长沙:中南大学,2013.
[5] 张程远,王文恺,王爽.基于岩体完整性评价的超声-地震波速度跨尺度转换方法研究[J].水利水电快报,2018,39(11):3.
[6] 申永利,孙永波.基于超声波 CT 技术的混凝土内部缺陷探测[J]. 工程地球物理学报,2013,10(4):560-565.
[7] 蒋志峰.超声检测频域分析及对缺陷识别应用研究[D].杭州:浙江大学,2004.



图8 PVC防水密封组件样图

防水密封组件应具有可变径、阻燃防火、水密、气密等功能,能够通过内置橡胶分层剥离实现变径,通过螺丝拧紧实现压紧功能,最终达到长期防渗漏效果。

给水、中水、燃气等入廊管线一般采用预埋套管。预埋套管要防水性能好,有一定的抗变形能力。预埋套管铺贴高分子防水卷材时,加贴两层同类防水卷材,并使用防水密封膏嵌缝,套管中部使用沥青麻丝填严。套管式穿墙管防水构造示意图如图9所示。

4 结 语

综合管廊是目前世界上比较先进的城市基础设施建设方式。为实现现代城市可持续发展,采用有别于传统市政管线铺设方式将成为必然。城市地下综

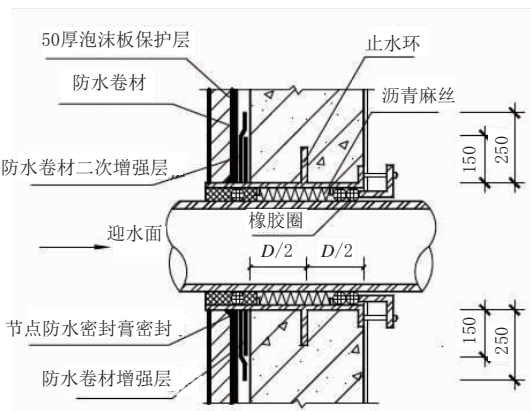


图9 套管式穿墙管防水构造示意图(单位:mm)

合管廊因其线性结构特点,设置有诸多变形缝或其他结构节点。这些部位若出现渗漏问题,将对主体结构和入廊管线的安全造成极其不利的影响,防水工程对于综合管廊的重要性不言而喻。

与其他地下工程一样,防水工程是城市综合管廊建设质量控制的关键环节。细部节点如变形缝、施工缝、预埋管等,是综合管廊防水的重点,因此应高度重视这些节点结构的防水设计与施工。

参考文献:

- [1] 张炳恒.三亚海棠湾城市地下综合管廊防水施工技术[J].中国建筑防水,2018,4(2):19-23.
- [2] 张勇.明挖法综合管廊防水技术探讨[J].中国建筑防水,2018,8(4):26-30.
- [3] 张浩,李小溪.明挖现浇综合管廊防水设计与施工技术探讨[J].中国建筑防水,2018,21(11):16-21.

(上接第299页)

- [8] 张海燕,周全,夏金东.超声缺陷回波信号的小波包降噪及特征提取[J].仪器仪表学报,2006,27(1):94-97.
- [9] 侯静.基于小波包分析的激光超声缺陷信号处理方法研究[D].太原:中北大学,2017.
- [10] 薛岩波,杨波,陈贞翔.小波分析在土木工程结构健康监测系统中的应用研究[J].山东大学学报:理学版,2009,44(9):28-31.
- [11] 丁幼亮,李爱群,缪长青.基于小波包能量谱的结构损伤预警方法研究[J].工程力学,2006,23(8):42-48.
- [12] 赵志宏.基于振动信号的机械故障特征提取与诊断研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [13] 翟文鹏,张小内,侯惠让,等.基于小波能量矩的嗅觉脑电信号识别[J].生物医学工程学杂志,2020,37(3):399-404.