

基于声波频谱特征的土体障碍物超声探测分析

杨立君¹, 诸 岩²

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

摘 要: 为了探究超声波法对土体中障碍物的探测效果, 以上海市某地区的黏性土为介质设计了室内试验, 并通过改变土的含水率和超声探测距离来研究不同因素对超声探测效果的影响。通过傅里叶变换对试验结果进行频谱特征分析, 分别从含水率、探测距离、障碍物三个方面分析不同影响因素下接收信号的频谱变化规律。研究结果表明: 随着含水率的增大, 接收信号的频谱畸变程度减小, 曲线上的突变点减少; 随着探测距离的增大, 接收信号的频谱畸变程度增大, 曲线上的突变点增多; 在含水率较低的情况下, 障碍物的存在对接收信号频谱的影响忽略不计, 在含水率较高的情况下, 障碍物的存在会导致接收信号的频谱畸变程度增大, 可以从频谱上进行识别。

关键词: 超声波法, 孤石探测, 频谱特征, 傅里叶变换

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)01-0264-05

0 引言

近年来, 随着中国社会经济水平的快速发展, 交通工程的规模和数量也呈现出不断上升的趋势^[1]。同时, 我国的隧道及地下工程建设也得到了空前的发展^[2]。我国已经成为世界上隧道及地下工程的建设大国^[3]。在多年的城市地铁建设中, 发展了一系列适合我国实际条件的地铁隧道施工方法, 其中, 盾构法因施工速度快, 对环境影响小, 适应能力强以及安全、环保等优点, 在城市地铁建设中得到了广泛的应用^[4-5]。

随着城市建设的快速发展, 地铁隧道建设的空间受到越来越多的限制, 出现了越来越多的复杂困难情况^[6]。目前, 多样化的地质水文条件依然是盾构法施工过程中不可忽视的难题, 包括断层、暗河、孤石等不良地质。其中, 孤石是存在于软质风化层中的花岗岩球状风化体^[7], 是地铁隧道盾构法施工过程中的巨大障碍^[8]。这些孤石会导致盾构机刀盘频繁卡住甚至变形, 影响工期进展, 在严重情况下, 孤石还会引起工作面的喷涌和塌方, 从而导致突发的地质灾害^[9]。因此, 在盾构开挖之前, 精确地勘察清楚挖掘区域范围内孤石群的分布情况, 是地铁盾构工程建设过程中急需解决的难题^[10]。

为了提高对不良地质体预报的精确度, 周轮^[10]

提出运用隧道综合超前地质预报技术, 即运用宏观地质分析法、TSP地震波法、地质雷达法以及超前钻探相结合的综合解决方案, 提高不良地质体超前地质预报精度。超声波探测技术最初在我国岩土行业中被应用于地层探测, 后来在混凝土无损检测和桩身完整性检测方面得到广泛应用, 并在海底残桩检测中也表现出良好的效果。该技术具有探测精度高、穿透性强以及操作简便等优点。因此, 将超声波探测技术加入到盾构隧道超前预报的综合探测方案, 与其他超前地质预报技术相结合, 共同解决目前盾构施工遇到的孤石等各类地质问题具有十分重要的意义。

1 超声波检测

超声波检测技术是一种利用超声波在物体内部的传播特性来对物体进行非破坏性检测的技术^[11]。在实际超声波检测中, 利用超声波发射换能器产生高频振动, 将超声波传播到被测物体的内部, 当超声波在物体内部传播过程中遇到缺陷或异质界面时, 会发生声波的反射、折射、绕射等现象, 即一部分声能会反射回来, 另一部分声能会透过缺陷区域继续传播, 并到达接收换能器。通过对接收到的信号进行分析, 可以得到被检测物体内部结构特性及缺陷信息, 从而实现了了对物体的检测。

超声波透射法是超声波检测方法中十分常用的一种方法, 其检测原理如图1所示, 利用这种检测原理制造的无损检测设备已经在许多实际工程中得到应用。透射法是通过对比不同位置处超声波接收换能

收稿日期: 2023-05-29

作者简介: 杨立君(1997—), 男, 硕士在读, 研究方向为岩土工程。

器接收到的信号的幅值、频率等指标的变化来判断被测物体内部的缺陷情况^[12]。而频率是指声波振动的周期性特征,描述的是波列中质点在单位时间内振动的次数。当超声波在性质不均匀的材料中传播时,由于超声脉冲波具有复频性,其包含多种不同频率成分的声波,且不同频率成分声波在传播过程中吸收、衰减也不同,以及超声波在不均质材料中具有不同的振动特性,导致换能器接收到的信号频谱非常复杂^[13]。当被检测物体内部存在缺陷或障碍物时,超声波的传播路径变长,同时,由于频散现象使得到达接收换能器的波形是多种不同频率波的叠加,因此缺陷或障碍物会对接收信号的频率成分产生影响,研究接收信号的频率成分可以反映出被检测物体的内部情况。

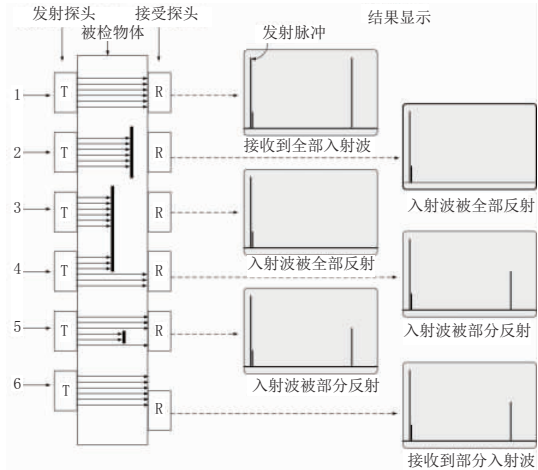


图1 声波透射法原理示意图

2 室内试验方案

为了探究土体中超声波的传播特性,以及在不同情况下对障碍物的探测能力,采用室内模型试验的方法,以上海市某地区的黏性土为研究介质。试验采用的模型箱长2.5 m,宽和高均为2.0 m。为了模拟土中障碍物的探测情况,选择了混凝土试块作为障碍物,混凝土试块的大小为40×40×40 cm。试验采用的探测设备是北京智博联生产的ZBL-U5600非金属超声检测仪,其主要技术参数如表1所示。

表1 非金属超声检测仪主要技术参数

主机参数	参数值
采样周期/μS	0.05~409.6 多档可选
记录长度	512~4096
发射电压/V	65、250、500、1 000
频带宽度/kHz	1~500
记录间距/cm	2~25 可选

试验流程如下,先在模型箱内铺塑料膜进行防水处理。将过筛后的土装入模型箱,每15 cm压实一层土体,避免拱起并刮毛表面,保证粘合。布置直径50 mm的PVC管和直径32 mm的PVC管,其中50 mm的PVC管加水作为超声探测通道,32 mm的PVC管加密封胶作密封处理,作为加水通道,同时混凝土试块放置在箱内,位置如图2所示。不断填土至模型箱内土体高度达到130 cm,之后在不同位置和深度处取土测定含水率。在四种距离下使用超声波设备进行探测,四种探测距离如表2所示。超声检测仪参数为采样周期0.8,记录长度1 024,发射电压1 000 V,记录间距2 cm,超声波换能器中心频率为45 kHz。通过预埋的PVC管加水改变含水率,三种含水率如表3所示,进行超声探测。

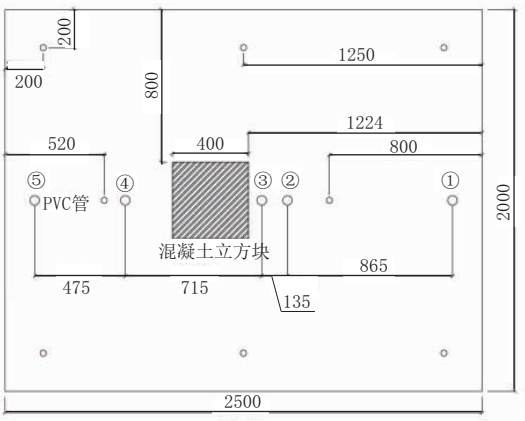


图2 模型箱内PVC管和混凝土布置(单位:mm)

表2 探测距离

探测组合	探测距离/mm
③-④	715
②-④	850
②-⑤	1 325
①-⑤	2 190

表3 含水率

含水率	数值
①	10.4%
②	23.0%
③	39.6%

3 傅里叶变换

傅里叶变换是法国数学家傅里叶所提出的,指出了任何一个复杂的函数都可以表示为简单的正弦之和^[14]。一个信号经傅里叶变换之后,横坐标为分离出的正弦信号的频率,纵坐标为对应的加权密度。傅里叶变换是一种信号分析方法,不仅能分析一个信

号所包含的成分,而且能用不同的成分合成信号。通过傅里叶变换可以将时域形式表达的信号转换为频域形式表达的信号,可以从频域的角度对信号进行分析处理^[15]。

连续函数 $f(t)$ 的傅里叶变换公式为:

$$F(\mu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi\mu t} dt \quad (1)$$

式中: t 为时域变量, μ 为频域变量。

4 频谱变化特征分析

频谱是频率谱密度的简称,是表示信号频率分布的曲线^[13]。在信号分析中,通常使用傅里叶变换来将信号从时域转换为频域,得到信号的频谱。频谱将对信号的研究从时域引入到频域,从而带来信号更为直观的理解和认识。信号的频谱可以提供信号在频域上的信息,对于信号的分析具有十分重要的作用^[16]。

4.1 含水率对超声探测信号频谱的影响

为了探究含水率对超声探测信号的频谱影响,以③至④管间超声探测信号为例,分析不同含水率下超声探测信号的频谱特征变化。图3是三种含水率下180 cm深度处信号的频谱,此位置不存在障碍物,从图中可以发现,含水率①下信号的频率成分主要位于0~200 kHz范围内,且在低频10.99 kHz处存在一个极值点,整个信号频谱畸变严重,存在许多毛刺;含水率②下信号的频率成分主要位于0~150 kHz范围内,且在低频7.324 kHz处存在一个极值点,整个信号频谱在0~100 kHz范围内畸变减少,频谱曲线毛刺减少,但其余频率范围内仍存在较多毛刺;含水率③下信号的频率成分主要位于0~150 kHz范围内,且在低频6.104 kHz处存在一个极值点,整个信号频谱在0~100 kHz范围内,频谱曲线毛刺进一步减少,曲线变得光滑,但其余频率范围内仍存在许多毛刺。随着含水率从10.4%增大至39.6%,信号的频谱发生了明显的变化。首先,随着含水率的增大,信号频谱曲线的畸变减少,曲线变得平滑,在主要频率范围内毛刺减少;其次,信号频率的主要成分幅值也与黏性土的含水率有关,随着含水率的增加,0~100 kHz范围内的频率幅值明显增大;另外,对于低频存在的极值点,随着含水率的增大,极值点在逐渐向低频偏移。

因为超声脉冲在土中传播时会受到土颗粒、孔隙、水等影响,从而发生反射、折射、散射等现象,导

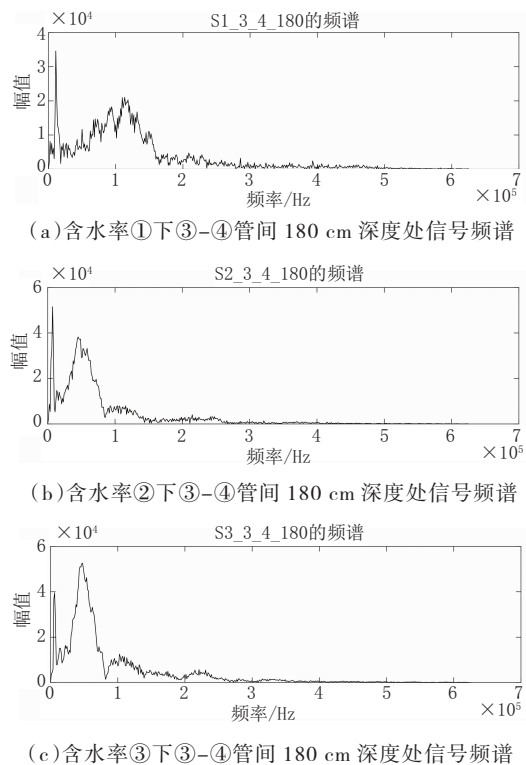


图3 不同含水率同一位置处超声探测信号频谱

致频率成分发生变化,由此可得,含水率增大会影响超声信号的频谱特征。此外,黏性土含水率增大会减少土体孔隙中气体的体积,使超声波在传播过程中反射、折射及衰减减少,使接收信号的波形频谱变得光滑。

4.2 探测距离对超声探测信号频谱的影响

以含水率③下超声探测信号为例,分析不同探测距离下信号频谱的变化特征。图4是③-④、②-④、②-⑤、①-⑤四种探测距离下180 cm深度处的信号频谱,该深度处不存在障碍物。从图中可以看出,不同距离下信号频谱曲线的整体趋势大致相同,主要频率范围分布在0~90 kHz范围内,在90~300 kHz范围内存在少量频率成分。观察四种探测距离下信号频谱在低频的极值点情况,③至④管间在低频6.104 kHz存在极值点,②至④管间在低频4.883 kHz存在极值点,②至⑤管间在低频4.883 kHz和7.324 kHz存在两个相近的极值点,①至⑤管间在低频4.883 kHz和8.545 kHz存在两个相近的极值点,可以发现,随着探测距离的增大,信号频谱在低频的极值点会由一个变为两个,且极值点对应的幅值也相应变大。观察信号的主要频率成分范围0~90 kHz,可以发现,随着距离的增大,这一范围内信号频谱曲线上毛刺逐渐变多,畸变程度增大,且幅值逐渐减小。对于90~300 kHz范围内的频率成分,在四种探

测距离下均包含大量毛刺,畸变程度较高,且随着探测距离的增大,其曲线幅值及畸变程度未发生明显变化,表明这一部分频率主要是噪声信号。

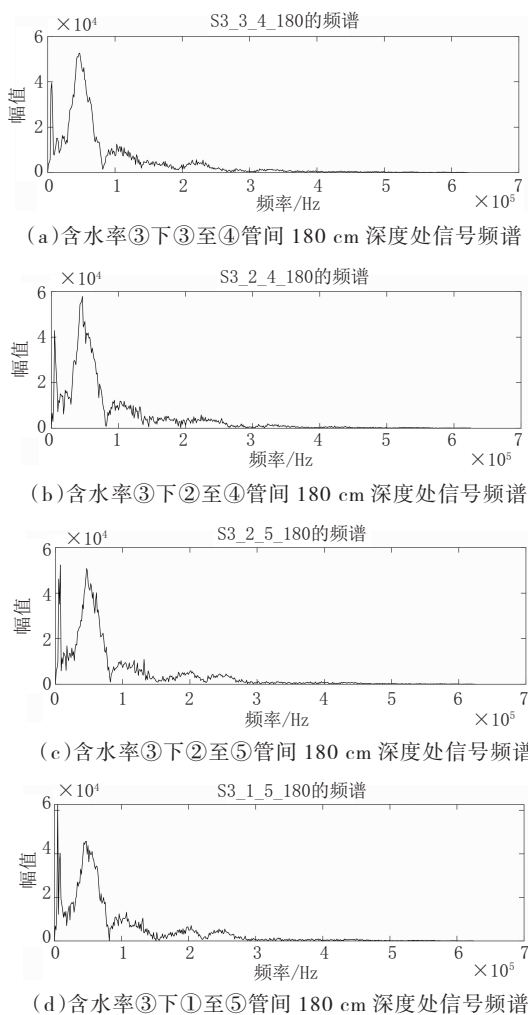


图4 不同探测距离同一位置处超声探测信号频谱

上述现象表明发射探头和接收探头之间距离增大会影响接收信号的频谱特征,因为土体会对超声波的能量产生吸收和散射作用,导致频谱主要成分的振幅逐渐降低,衰减程度增加。同时,超声波在传播过程中的传播速度和衰减程度发生变化,不同频率的波具有不同传播速度,导致波形失真、频率成分改变。反射和折射现象也会越来越明显,导致信号的变化和失真,表现为频谱曲线畸变程度变大、突变点增多。超声波在传播过程中还会发生频散现象,使信号的高频成分转变为低频成分,即信号的低频幅值增大。

4.3 障碍物对超声探测信号频谱的影响

为了探究在不同含水率下障碍物对超声探测信号的频谱影响,以③至④管间超声探测信号为例,分析相同含水率下 180 cm 深度和 140 cm 深度两个位置处超声探测信号的频谱特征变化,其中 180 cm 深度处不存在障碍物,140 cm 深度处存在障碍物。图 5

至图 7 分别是三种含水率下存在障碍物和不存在障碍物两个位置处信号的频谱。从图 5 中可以看出,在含水率较低的情况下,障碍物位置处信号频谱和无障碍物位置处信号频谱的曲线走势大致相同,且曲线上的突变点很多,畸变程度严重。这种情况下,障碍物的存在对超声探测接收的信号频谱影响不再明显,无法从频谱图中看出差别。这是因为在含水率较低的情况下,黏性土中孔隙率高,土体中存在大量孔隙及空气与土颗粒界面,超声波在传播过程中在遇到孔隙及空气与土颗粒界面时会发生大量反射、折射现象,造成接收信号频谱存在大量突变点,曲线发生明显畸变,在这种情况下,障碍物的存在对超声波的传播和反射影响小于土体对超声波传播的影响。

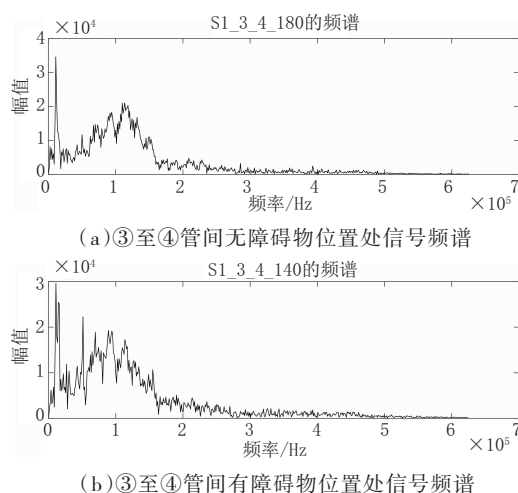


图5 含水率①下③至④管间有无障碍物两个位置处信号频谱

从图 6 中可以看出,在含水率进一步升高的情况下,障碍物位置处信号频谱和无障碍物位置处信号频谱的曲线走势大致相同,且信号的频率的主要成分范围也相同。随着含水率的进一步提高,有、无障碍物两个位置处信号的频谱差异相比于含水率①会更加明显。存在障碍物位置处信号的频谱相比于无障碍物位置处信号频谱在主要频率成分方面会出现更多的突变点,即畸变程度更大。同时,由于障碍物的存在也导致接收信号的主要频率成分幅值出现略微的降低。出现这一系列现象的原因是在含水率较高的情况下,黏性土中孔隙部分被水填满,土体的孔隙率下降,一部分空气与土颗粒的界面转变成水与土颗粒的界面,这种变化导致接收信号频谱的突变点大量减少,曲线的畸变程度也进一步降低,在这种情况下,障碍物的存在对超声波的传播和反射影响逐渐变得明显。

从图 7 中可以看出,在含水率进一步提高的情况下,障碍物位置处信号频谱和无障碍物位置处信

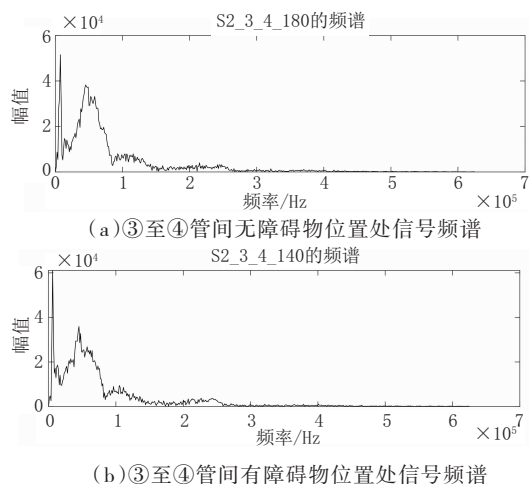


图6 含水率②下③至④管间有无障碍物两个位置处信号频谱

号频谱的曲线走势大致保持相同,且信号的频率的主要成分范围相同。但是,在这种情况下,障碍物的存在对超声探测接收的信号频谱影响变得更加明显,从信号的频谱图上可以看出非常明显的差异,即存在障碍物位置的信号频谱相比于不存在障碍物位置的信号频谱,在主要频率成分范围内会出现更多的突变点,二者的频谱曲线的畸变程度明显不同。且存在障碍物位置处信号的主要频率成分的幅值也明显低于不存在障碍物位置处信号对应频率成分的幅值。出现这一现象的原因是在含水率进一步提高的情况下,黏性土中的孔隙大部分被水填满,土体的孔隙率变得很小,大量的空气与土颗粒的界面转变成水与土颗粒的界面,且超声波在水中的衰减小于在空气中的衰减,这种土体内部结构的变化导致超声波在土体的传播路径发生很大变化,使得接收信号频谱的突变点大量减少,曲线的畸变程度也进一步降低,在这种情况下,障碍物的存在使得超声波在遇到障碍物时产生的反射、折射现象对接收信号的影响逐渐变得明显。

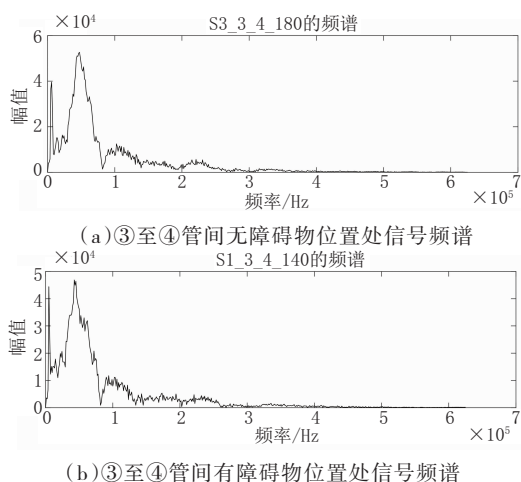


图7 含水率③下③至④管间有无障碍物两个位置处信号频谱

5 结论

根据超声检测信号的频谱分析可知,在含水率较低的情况下,不同探测距离下接收信号的频谱呈畸变状态,整个频谱曲线上存在大量的突变点;当含水率逐渐增大时,不同探测距离下的接收信号的频谱曲线逐渐变得平滑,突变点数量减少。这表明含水率的高低对超声波的探测效果有着一定的影响,当含水率较低时,不同探测距离下的频谱曲线畸变均很严重,障碍物的存在在频谱上不能表现出来,无法通过频谱对障碍物进行识别;当含水率逐渐增大时,不同探测距离下的频谱曲线逐渐平滑,此时障碍物的存在会导致频谱曲线上出现一定畸变,故可以对障碍物进行识别。

参考文献:

- [1] 中国公路学报编辑部.中国隧道工程学术研究综述·2015[J].中国公路学报,2015,28(5):1-65.
- [2] 钱七虎.隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J].隧道建设,2017,37(3):251-263.
- [3] 王梦想.中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J].隧道建设,2010,30(4):351-364.
- [4] 侯学渊,刘建航.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [5] HE C, WANG B. Research progress and development trends of high-way tunnels in China[J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(4): 209-223.
- [6] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015,50(1):97-109.
- [7] 王鹏华.不同地质条件下盾构工程孤石处理工艺及实例[J].隧道建设,2012,32(4):571-575.
- [8] 王典.地铁工程球状风化专题勘察方案研究[J].广州建筑,2011(2):42-46.
- [9] 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.
- [10] 周轮,李术才,许振浩,等.隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J].山东大学学报(工学版),2017,47(02):55-62.
- [11] LIN L, HUANG Z P. Study on cross-hole ultrasonic testing method for cast-in-place concrete piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26: 98.
- [12] 刘鑫,孙东宁,盛柯,等.声波透射法测试路用气泡混合轻质填料的试验研究[J].工程科学与技术,2020,52(2):62-69.
- [13] 闫长斌.基于声波频谱特征的岩体爆破累积损伤效应分析[J].岩土力学,2017,38(9):2721-2727.
- [14] CAO R. The Fourier transform and its application[J]. Pure Mathematics, 2014: 138-143.
- [15] 李兵,闫聪聪. MATLAB2020 信号处理从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [16] 简文彬,吴振祥,邓鼎兴.某地下工程围岩的声波频谱特性[J].岩土力学,2003(S2):623-626.