土质滑坡临滑前次声信号特征研究

崔文杰[1,2]，滕鹏晓[2]，韩宝坤[1]
(1. 山东科技大学，山东青岛 266590；2. 中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室，北京 100190)

摘要：土质滑坡临滑前，土壤内部颗粒的错动、摩擦和土体裂纹的扩展会产生次声波。为了明确土质滑坡临滑前次声信号的特性，对土质坡体模型进行了 6 组滑坡模拟实验，同时采集实验过程中产生的次声信号。利用短时傅里叶变换对采集的信号进行时频分析，然后利用小波分解法研究信号在各个频段上的能量特性。分析结果表明：土质滑坡临滑前有特殊的次声信号产生，信号的频率主要集中在 0.5～6 Hz 和 12.5 Hz 附近。根据土质滑坡蠕滑阶段的发展规律推断：0.5～6 Hz 频段的次声信号为滑面处颗粒间错动、摩擦产生；频率在 12.5 Hz 附近的次声信号为滑体内部裂纹扩展产生。通过实验得到的次声特性可以作为土质滑坡次声监测的重要参考。

关键词：土质滑坡；次声；时频分析；能量特性
中图分类号：O425 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2018)-02-0157-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.02.011

Characteristics of infrasound signals just before landslide

CUI Wen-jie[1,2], TENG Peng-xiao[2], HAN Bao-kun[1]
(1. *Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao* 266590, *Shandong*, *China*;
2. *Key Laboratory of Noise and Vibration Research*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: The motion and friction of soil particles and the crack expansion in land will generate infrasound waves just before landslide. In order to analyze the characteristics of infrasound signals just before landslide, six groups of landslide simulation experiments are conducted with a soil slope model, and the generated infrasound signals in the experiments are acquired. The time-frequency characteristics of the signals are analyzed by using the short time Fourier transform and the energy features of the signals in each frequency band are studied by wavelet decomposition in this paper. The result shows that there are special infrasound signals generated before landslide, and the frequencies of the signals are mainly concentrated in 0.5～6 Hz and 12.5 Hz around. According to the development law of land slide creeping stage, the infrasound signals of 0.5～6 Hz are generated by the intermittent motion and friction of soil particles on the slip surface; and, the infrasound signal near 12.5 Hz is generated by the crack expansion of the sliding body. The infrasound characteristics obtained by the experiments can be used as an important reference for the infrasound monitoring of landslide.

Key words: earthiness landslide; infrasound; time-frequency analysis; energy feature

0 引 言

滑坡是我国分布最广泛和发生最频繁的地质灾害，具有突发性和高破坏性，严重威胁着人民生命财产安全。据国土资源部发布的 2015 年全国地质灾害通报，该年全国共发生地质灾害 8 224 起，其中滑坡 5 616 起，占地质灾害总数的 68.3%。

利用次声对滑坡进行动态监测预警是一个研究热点，也是减害降灾的重要手段。在滑坡临滑前，斜坡上部分岩土在重力的长期作用下发生挤压、剪切和摩擦，会释放出次声波[1-3]。次声波具有频率低、波长长、穿透能力强、衰减慢等传播特点，能够在很远的距离外被次声传感器监测到。利用次声对滑坡进行监测预警的研究有很多，大多是将滑坡体临滑时岩石断裂的声发射信号进行采集处理[4-5]，主要针对岩质滑坡，而对于土质滑坡的研究非常少。事实上，在黄土高原和东南福建等地区，土质滑坡占滑坡总数的 95%以上[6]。因此，对土质滑坡次声特性的研究十分有必要。

在滑坡表面或更深部滑移发生前，滑面处的非平衡力学状态会首先导致滑面发生应变而产生微变形滑动，即蠕滑。土体属于典型的非均匀离散材料，微滑动发生时必伴随着滑面处颗粒间相对错动、摩擦和土体裂纹展开，释放出次声信号，分析蠕滑时产生次声波的规律和物理特征，包括频率、

收稿日期：2017-04-23；**修回日期**：2017-06-30
作者简介：崔文杰(1991－)，男，山东泰安人，硕士研究生，研究方向为次声监测。
通讯作者：滕鹏晓，E-mail: px.teng@mail.ioa.ac.cn

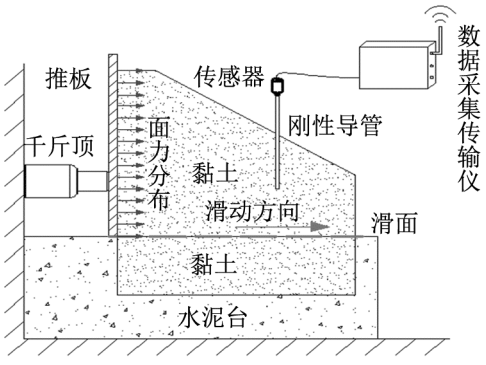
幅度和信号能量等，明确这些特征的规律，对于土质滑坡监测预警具有重要的意义。本文通过实验的方法，对 6 组土质坡体模型进行了滑坡模拟实验，所使用的土样取自重庆市奉节滑坡灾害区。奉节地处三峡库区腹心，滑坡频发，是重点灾害监测区域。实验土样为粉质黏土，山区斜坡上的粉质黏土在一定积水或重力条件下极易引发滑坡。因此，取该种土样进行实验，并对土质滑坡临滑前的特殊次声信号进行分析和探讨，为实现利用次声波对土质滑坡灾害进行监测和预警作前期的数据积累。

1 实验过程及数据采集系统

1.1 实验过程

实验采用人工方式模拟土质滑坡，实验模型如图 1(a)所示。图中水泥台作为基础，上表面设有凹槽，将黏土填入凹槽中，高出水泥台平面的部分用模具堆积成斜坡形，并将所有黏土夯紧压实，使之成为一体。刚性导管起到传导声波的作用，一端与传感器相连，另一端预埋在坡体上部并压实固定用以采集次声信号。传感器与数据采集传输仪通过信号线相连，如图 1(b)所示。

(a) 模型图



(b) 模型示意图

图 1 土质滑坡模型示意图

Fig.1 Schematic of landslide mode

实验时，由千斤顶推动推板将力均匀地作用在滑体上，用以模拟滑坡产生时滑体自身重力沿滑移方向的分力，缓慢施加推力直至滑体发生整体滑移为止，水泥台的上表面即为滑坡滑移面。此过程中产生的信号由传感器获取，并通过数据采集传输仪采样后上传给上位机进行处理分析。

1.2 数据采集传输系统

实验中数据采集传输系统是由次声传感器和数据采集传输仪组成。

次声波测量仪器采用中国科学院声学研究所研制的 IDS2016 型次声传感器，该传感器具有体积小、灵敏度高、对机械振动不敏感、频响好的优点。其 3 dB 平稳带宽保持在 0.5～200 Hz 范围内，灵敏度为 50 mV·Pa^{-1}，在 1～100 Hz 频率范围内灵敏度曲线平直，可以完全覆盖滑坡产生次声波的整个频段，实际测量的传感器频率响应特性曲线如图 2 所示。次声传感器将滑坡时产生的声波信号转换成电信号，数据采集传输仪再将传感器的电信号转换成数字信号，通过无线网络传输给上位机进行分析处理，实验中，数据的采样频率设为 100 Hz。

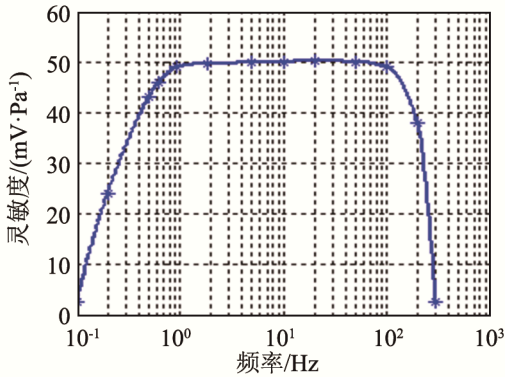


图 2 IDS2016 型传感器的频率响应曲线

Fig.2 Frequency-response curve of type-IDS2016 sensor

1.3 背景噪声分析

本实验为人工滑坡模拟实验，并非在消声室内进行，实验场地附近难免会有噪声干扰，实验过程中，在距离实验点 50 m 处有通风机在运行。对实验中的噪声干扰进行分析和识别是准确获取土质滑坡时次声信号特征的必要过程。

在千斤顶加载之前开启数据采集传输仪，对背景噪声进行采集。图 3 为背景噪声的波形图，将采集到的背景噪声做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform，FFT)后得到其频谱，结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，背景噪声的频率主要集中在 25 Hz 和 40 Hz 附近，前面已经提到实验现场不远处有通风机在运行，由此可以推断主要的噪声源

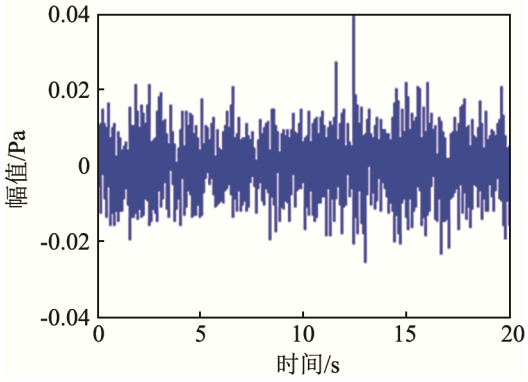


图 3　背景噪声波形图
Fig.3　Waveforms of background noise

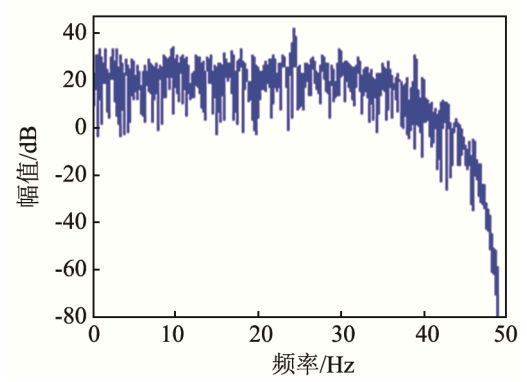


图 4　背景噪声频谱
Fig.4　Spectrum of background noise

为风机噪声。分析结果显示，背景噪声的频率分布都在 20 Hz 以上，国内外专家学者的研究表明，土质滑坡时产生的信号频率主要集中在 0.1～32 Hz[7]。同时，本研究只关注信号的次声部分，即 20 Hz 以下，因此，可以对信号进行低通滤波处理。这里利用巴特沃斯滤波器对信号进行处理，设置通带截止频率为 20 Hz，阻带截止频率为 25 Hz，通带内最大衰减为 0.5 dB，阻带衰减为 30 dB。

滤波处理后背景噪声的波形和频谱分别如图 5 和图 6 所示，由图 5 可知，其平均声压幅值在

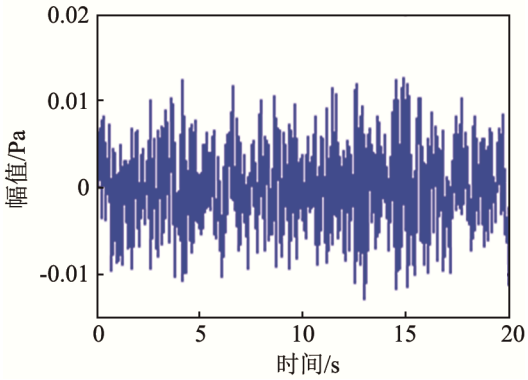


图 5　滤波后背景噪声波形图
Fig.5　Waveform of background noise after filtering

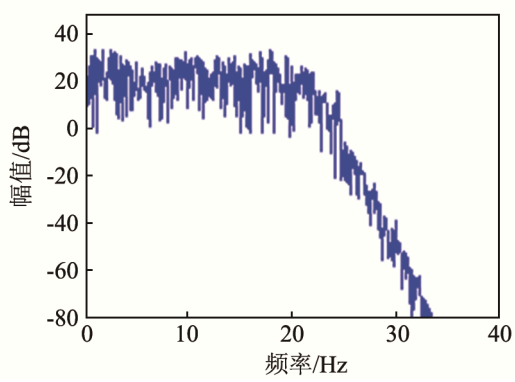


图 6　滤波后背景噪声频谱
Fig.6　Spectrum of background noise after filtering

–0.01～0.01 Pa 之间。从图 6 中可看出，波形平稳，20 Hz 以下无明显干扰信号。

2　数据分析处理方法

傅里叶变换是信号分析最基本、最常用的方法，但是传统的傅里叶变换是将时域上的全局信号转换到频域内，无法观察信号在特定时间内频域上的特性，即无法实现局部化分析。对于非平稳信号，往往需要研究信号的某些局部频率及其对应的时间的变化规律，即进行时频联合分析。因此，传统傅里叶变换不再适用。时频分析适合研究非平稳信号，对于描述信号的频谱随时间的变化规律，有其不可替代的作用，是现代信号处理的研究热点。

时频分析最常用到的方法是短时傅里叶变换和小波变换。本研究中同时使用短时傅里叶变换和小波分解对得到的次声信号进行分析。短时傅里叶变换得到的时频图简单直观；小波分析可以将信号进行多尺度分解，有利于研究每个分层上信号的能量分布特性。两种方法联合使用，有利于准确地获取信号特性。

短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform，STFT)的基本思想是：在时域上利用一个窗函数 $g(\tau)$ 去截取信号，被截取的信号在有限时间宽度内是近似平稳的，然后对该时间间隔内的信号做傅里叶变换，不断移动窗函数位置，就可以得到不同时刻的傅里叶变换，实现局部化分析。设有一个信号 $x(t)\in L^2(R)$，其短时傅里叶变换定义为

$$F_{\mathrm{STFT}}(t,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}x(\tau)g_{t,\omega}^{*}(\tau)\mathrm{d}\tau=\int_{-\infty}^{\infty}x(\tau)g^{*}(\tau-t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}\tau=<x(\tau),g(\tau-t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}> \tag{1}$$

式中：$g_{t,\omega}(\tau)=g(\tau-t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}$；$\int_{-\infty}^{\infty}|g(\tau)|^2\mathrm{d}t=1$。

由此可见，短时傅里叶变换物理意义明确，能够给出简单直观的时频构造。

小波变换是利用一个形状可变的窗函数(即基小波)把信号分割成不同的频率成分，然后再用分解的方法研究对应尺度下的成分，有利于对信号的局部进行分析。

对于任意平方可积的函数 $\varphi(t)$，其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$，若 $\Psi(\omega)$ 满足

$$\int_R\frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty \tag{2}$$

则称 $\varphi(t)$ 为小波基函数。将小波基函数进行伸缩和平移，得：

$$\varphi_{a,b}(t)=a^{-\frac{1}{2}}\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right),\quad a,b\in R;\ a\neq0 \tag{3}$$

式中，$\varphi_{a,b}(t)$ 为一个小波序列，a 为尺度因子，b 为时间因子。若给定一个信号 $x(t)\in L^2(R)$，则其小波变换的定义为

$$W_x(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_R x(t)\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t=<f,\varphi_{a,b}> \tag{4}$$

3 实验结果分析

3.1 土质滑坡次声信号时频分析

本次研究中共进行 6 组土质滑坡模型实验的信号采集，将数据经过前文提到的滤波器处理后，得到土质滑坡临滑前的时域信号波形，如图 7 所示，其中图 7(a)～7(d)为局部放大后的波形图。由图 7 可见，在滑坡产生的过程中有明显的信号产生，对原始信号进行短时傅里叶变换，得到信号的时频图，如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，在发生土质滑坡时会产生两种明显的特征信号：第一种是在 47、125、205 s 和 281 s 时，出现频率为 12.5 Hz 的信号，且结合图 7 中信号波形来看，该频率信号出现时会有一个明显的负压波产生，如图 7 中 7(a)、7(b)、7(c)、7(d)所示，类似于突然卸载的力学特性；第二种是能量主要集中在 0.5～6 Hz 范围内、频带相对较宽的次声信号。在第一种特征信号出现前和出现后，都有第二种特征信号产生。根据滑坡蠕滑的规律可知[8]，滑体在滑移方向力的作用下，首先是滑体后缘先发生剪切断裂，断裂处颗粒产生错动和摩擦，然后裂纹逐渐向滑体前缘拓展，当滑体前缘发生剪切断裂时，整个滑面贯通，然后滑坡产生整体滑动。由蠕滑阶段的发展规律推断：频率为 12.5 Hz 的信号为

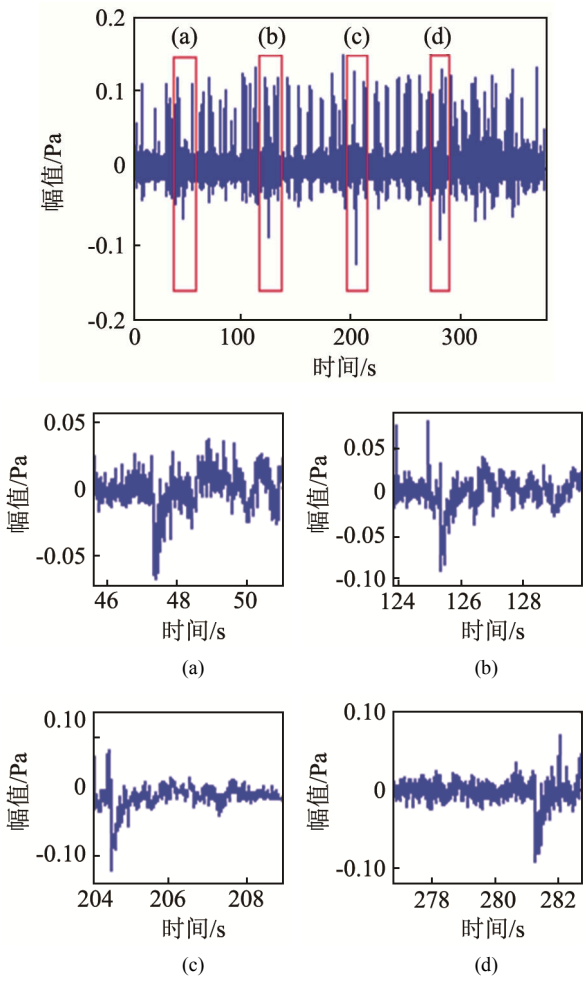


图 7 滤波后信号波形图

Fig.7 Signal waveforms after filtering

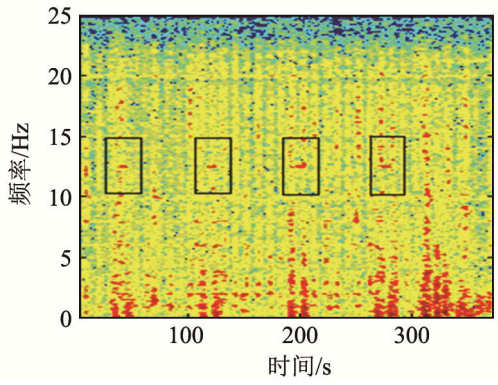


图 8 土质滑坡实验时频图

Fig.8 Time-frequency diagram of landslide test

滑坡体裂纹扩展的特征信号；频率为 0.5～6 Hz 的信号为滑面处颗粒间相对错动、摩擦的特征信号。

3.2 土质滑坡次声信号能量特性分析

上文对滑坡临滑前次声信号进行了时频分析，接下来，将对次声信号在各个频段上的能量特性进行分析和研究。利用小波对信号进行多尺度分解，得到信号在不同频段上的特征。进行小波分解时，

首先要选择合适的小波基，根据以往专家学者对岩土破裂的研究[9-10]，选择 db 6 小波基对信号进行分解分析。

本文的研究中，信号的采样频率为 100 Hz，即信号中存在的最高频率为 50 Hz，这里利用选择的 db 6 小波基将信号进行 4 层分解，得到 5 个频段，各个频段的频率范围如表 1 所示。这种方式将关心的次声部分成了 4 个频段，有利于分析次声各个频段上的信号特征。

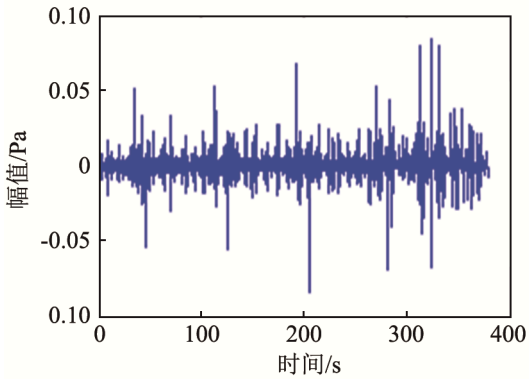
表 1　信号 4 层分解后的频率范围

Table 1　The frequency ranges after four-level decomposition

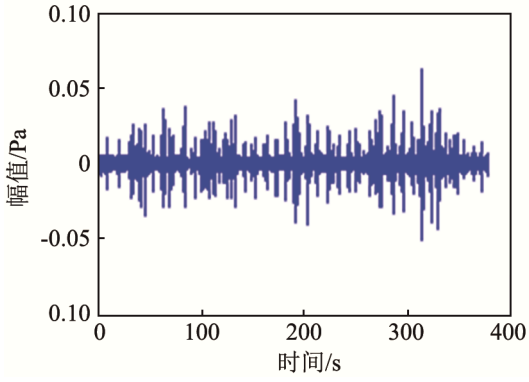
分解层次	a_4	d_4	d_3	d_2	d_1
频率范围/Hz	0~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25	25~50

将图 7 中的信号利用 db 6 小波基进行 4 层分解后，得到近似分量和各层细节分量波形，如图 9 所示。

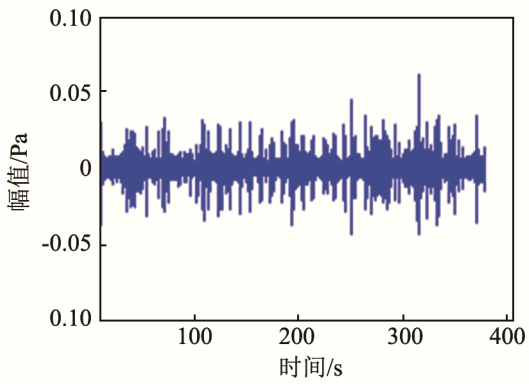
从图 9 可以看出，信号经过 4 层小波分解后，在次声部分仍然保持较为清晰的波形，除 d_1 外其他各层信号幅值都在 10^{-2} 数量级上，说明信号在 a_4、d_4、d_3 和 d_2 上能量相对较高，含有较多信号的有效成分。为了进行定量分析，下面计算各小波分解



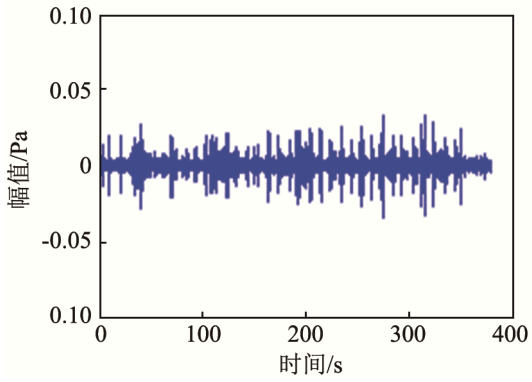
(a) 第 4 层分解近似分量 a_4



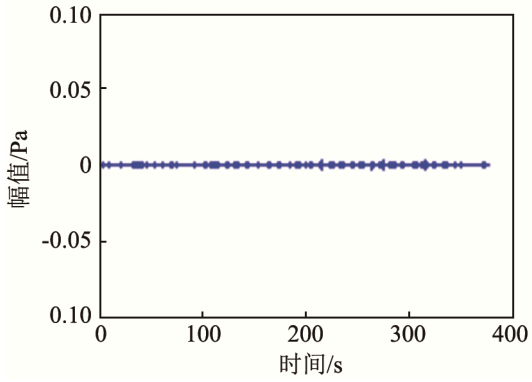
(b) 第 4 层分解细节分量 d_4



(c) 第 3 层分解细节分量 d_3



(d) 第 2 层分解细节分量 d_2



(e) 第 1 层分解细节分量 d_1

图 9　4 层小波分解波形图

Fig.9　Waveforms after four-level wavelet decomposition

系数能量占总能量的百分比。

设信号的总能量为 E，小波 n 层分解后的近似部分的能量为 E_{an}、各层细节分量部分的能量为 $E_{dj}(j=1,2,\cdots,n)$，则有

$$E=E_{an}+\sum_{j=1}^{n}E_{dj} \tag{5}$$

那么，各个小波系数能量百分比可表示为

$$\rho(a_n)=\frac{E_{an}}{E}\times 100\% \tag{6}$$

$$\rho(d_j)=\frac{E_{dj}}{E}\times 100\% \tag{7}$$

其中：$\rho(a_n)$ 为第 n 层近似分量的能量占的百分比；

$\rho(d_j)$ 为第 j 层细节分量的能量占的百分比，这里 n=4。通过上述方法计算出实验中 6 组信号 4 层分解后各个频段能量的百分比，如表 2 所示。

对照表 1 和表 2 可以看出，在土质滑坡蠕滑阶段会有次声信号产生，在 0～12.5 Hz 频段内，信号能量占到总能量的 80%以上。在 12.5～20 Hz 频段内的信号能量占比相对较少，在 0～3.125 Hz 频段内的信号能量占比最高，在 3.125～12.5 Hz 频段内的信号能量分布相对比较均匀。

表 2 各小波分解系数能量百分比

Table 2 The energy percentage of each wavelet decomposition coefficient

组别	各小波分解系数能量百分比/%				
	$\rho(a_4)$	$\rho(d_4)$	$\rho(d_3)$	$\rho(d_2)$	$\rho(d_1)$
1	54.18	15.21	19.96	10.58	0.07
2	63.78	15.07	15.29	5.82	0.04
3	30.47	16.15	32.06	21.14	0.18
4	49.17	19.35	21.14	10.26	0.08
5	42.75	22.85	20.63	13.70	0.09
6	32.40	20.23	31.39	16.15	0.13

注：以上数值均保留到小数点后两位数字

时频分析的结果表明，信号能量集中的区域在 0.5～6 Hz 频段和频率 12.5 Hz 附近。结合两个分析的结果可以得出，土质滑坡蠕滑阶段产生的信号确实为次声信号，且信号频率主要分布在 0.5～12.5 Hz 之间，其中相对能量集中的两个频段在 0.5～6 Hz 和 12.5 Hz 附近。前文推断了两个频段特征信号可能对应的土质滑坡蠕滑阶段的两种特征事件，可以作为土质滑坡蠕滑的特征信号以供监测参考，具体能否作为确定的特征信号进行土质滑坡灾害的监测预警，还需要进行更深一步的研究和验证。

4 结 论

(1) 土质滑坡发生整体滑动前会有次声信号产生，经过分析可知，次声信号的能量主要分布在 12.5 Hz 及以下的频带范围内。

(2) 土质滑坡的蠕滑阶段会产生两种特征的次声信号：滑体内部裂纹扩展信号和滑面处颗粒间错动、摩擦信号。滑体内部裂纹扩展时产生的次声信号的频率主要集中在 12.5 Hz 附近；而错动和摩擦时产生次声信号的频率主要集中在 0.5～6 Hz 频段内。这两种信号可以作为土质滑坡监测的重要参考，但仍需要更深一步的验证。

(3) 颗粒错动、摩擦的信号与裂纹扩展信号交替出现，与土质滑坡蠕滑阶段的发展规律基本相符。

参 考 文 献

[1] LIU Dunlong, LENG Xiaopeng, WEI Fangqiang, et al. Monitoring and recognition of debris flow infrasonic signals[J]. Journal of Mountain Science, 2015, **12**(4): 797-815.

[2] PANKOW K L, MOORE J R, HALE J M, et al. Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data[J]. Gsa Today, 2014, **24**(1): 4-9.

[3] YAN Y, CUI P, CHEN S C, et al. Characteristics and interpretation of the seismic signal of a field-scale landslide dam failure experiment[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(2): 219-236.

[4] 余小平, 庹先国, 刘明哲, 等. 滑坡体临滑声发射监测主机的设计[J]. 自动化与仪表, 2011, **36**(8): 21-24.
YU Xiaoping, TUO Xianguo, LIU Mingzhe, et al. Design of acoustic emission monitoring host machine for landslide mass critical-sliding[J]. Instrument and Meter Plant, 2011, **36**(8): 21-24.

[5] 任际周. 基于次声波技术的滑坡监测预警系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012:1-20.
REN Jizhou. Research of landslide monitoring early warming based on sonic technology[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 1-20.

[6] 唐亚明. 陕北黄土滑坡风险评价及监测预警技术方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 10-13.
TANG Yaming. Methods on risk assessment and monitor & early-warning for the loess landslide in north of Shaanxi[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012: 1-20.

[7] CHEN T C, LIN M L, WANG K L. Landslide seismic signal recognition and mobility of an earthquake-induced rockslide in Tsaoling, Taiwan[J]. Engineering Geology, 2014, **171**(3): 31-44.

[8] 李守义, 廖元庆. 某工程库区滑坡蠕滑特性分析[J]. 自然灾害学报, 2009, **18**(6): 135-140.
LI Shouyi, LIAO Yuanqing. Creep behavior analysis of landslide in a project reservoir area[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, **18**(6): 135-140.

[9] 徐洪, 陈正华, 周廷强, 等. 基于小波分解的岩石破坏次声信息特征研究[J]. 应用声学, 2016, **35**(3): 231-238.
XU Hong, CHEN Zhenghua, ZHOU Tingqiang, et al. Characteristics analysis of infrasound before rock failure applying the wavelet decomposition[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, **35**(3): 231-238.

[10] 李潇, 徐进军. 基于小波分析与 LSSVM 的滑坡变形预测[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, **29**(4): 127-130.
LI Xiao, XU Jinjun. Landslide deformation prediction based on wavelet analysis and least square support vector machine[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, **29**(4): 127-130.