

林彬华、金星、廖诗荣等, 2015, 地震噪声异常实时监测, 中国地震, 31(2), 281 ~ 289.

· 研究论文 ·

地震噪声异常实时监测

林彬华^{1,2)} 金星^{1,2,3)} 廖诗荣¹⁾ 李军¹⁾ 黄玲珠¹⁾ 朱耿青¹⁾

1) 福建省地震局, 福州市华鸿路 7 号 350003

2) 福州大学, 福州市闽侯县大学城学园路 2 号 350002

3) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

摘要 本文以福建省 85 个测震台站 2012 年全年噪声资料中的垂直向记录作为研究对象, 将噪声记录以每 5min 为单位进行分段, 求出每小段的功率谱, 应用概率分布函数方法绘出台站的 PDF 图, 之后利用网格概率法确定出台站的高低噪声参照线。另外, 以 85 个台站的 PDF 图为基础, 将噪声异常分成缺数异常、低噪处异常、高噪处异常、中噪处异常等 4 类。依据 4 类异常的特征分别找出每一类异常的遴选方法, 再将这 4 种挑选方法相结合形成地震噪声实时监测系统。选取福建省 85 个测震台站 2013 年 7 月份的噪声记录进行验证, 结果表明: 85 个台站应用地震噪声实时监测系统识别出来的异常正确率都达到 90% 以上, 遴选效果很好, 可用于对台站噪声实时监测。

关键词: 地震噪声 PSD PDF 功率谱 异常 数据质量

[文章编号] 1001-4683(2015)02-0281-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震波形数据的质量很大程度取决于地震观测仪器系统是否正常工作。为了检测地震仪器是否发生异常, 通过每天对其进行脉冲标定, 可以发现大部分故障。但是这种方法需要人工操作判断, 工作量大、实时性差, 很难及时发现异常。除此之外, 对于要求分秒必争的地震预警, 要实时监测数据质量状况, 为后续到来的地震, 快速计算震级和定位提供客观、科学的数据。因此目前迫切需要一种新手段来实时监测地震记录系统是否能正常工作, 从而保证地震数据的最优质量。

国际上, McNamara 等 (2004、2005a) 提出用功率谱概率密度函数 (PDF) 方法进行台站地震噪声水平监测, 并在 GSN 与 ANSS 等台网应用于日常仪器工作状态检测。廖诗荣等 (2008) 选取台站 48 小时的噪声记录, 并以 160s 为单位对噪声记录进行分段, 然后采用概率

[收稿日期] 2013-12-30; [修定日期] 2014-2-21

[项目类别] 国家科技支撑计划 (2009BAK55B00)、福建省地震局科技攻着项目 (G201401) 联合资助

[作者简介] 林彬华, 男, 1988 年, 硕士。主要从事地震动观测、地震预警等方面的研究。E-mail: lbhfzu@sina.com

密度函数(PDF)方法求出台址的总体噪声水平,最后完成了自动化处理地震台站遴选测试。Sleeman(2007)在 Orfeus 数据中心通过监测实时波形数据中地震噪声加速度功率谱密度(PSD)值的变化,在 VEBSN(Virtual European Broadband Seismograph Network)实现了对宽频带地震台网波形数据质量的自动检测。徐嘉隽等(2010)研发了数据质量检测软件,其主要原理也是利用概率密度函数方法计算一天的噪声记录,然后针对自动绘制出的 PDF 图及 RMS 值,直观地判断观测数据的质量,并已经应用于日常地震观测系统数据质量的检测。为了能够实时监测地震仪器工作状态,本文采用功率谱概率密度函数(PDF)方法绘制出台站的 PDF 图,再用网格概率方法确定台站高低噪声参照线,进而研究噪声异常的遴选方法,最后形成地震噪声实时监测系统。

1 地震噪声概率密度函数方法概述

可将地震噪声视为平稳随机信号,依据随机过程理论,通常用概率统计方法来描述随机信号。平稳随机信号在时间上是无限的,其能量也是无限的,但其功率却是有限的。平稳随机信号的功率谱反映了信号的功率在频域内随频率的分布,也称功率谱密度(简称 PSD)。

Peterson 等(1993)通过分析全球 75 个地震台站近 2000 条噪声记录的功率谱密度分布,给出了全球低噪声模型(NLNM)与高噪声模型(NHNM),该模型目前广泛应用于对台址噪声水平的评价、仪器标准定义以及不同背景噪声水平下地震计响应的预测等。需要指出的是,Peterson 用来进行建立地震噪声模型的 2000 条噪声记录是从近 12000 条波形记录中筛选出来的,其它近 10000 条包含地震、爆破、标定等非地震噪声的记录段并未参与最后的处理。

为了减免非地震噪声记录段的筛选与截取这个波形预处理环节,对包括非地震噪声记录段在内的原始连续波形记录直接处理,McNamara 等(2005a, 2005b)提出应用 PSD 概率密度函数(PDF)方法进行地震噪声 PSD 值的计算。该方法的主要思路是:将原始波形数据分成 n 个记录段,采用与 Peterson 相同的方法对每个记录段计算 PSD 值,使用 $1/3$ 倍频程的频率间隔对每个记录段 PSD 曲线进行平滑;然后计算 PSD 值落在某一个频点某一功率窗内的记录段数目,以该记录段数目与总记录段数目 n 的比值作为该频段该功率窗的 PSD 概率密度函数的取值。图 1(a)是对 YDXS 台站 194545 个原始噪声波形记录段(1 年数据)使用概率密度函数方法处理得到的 PDF 图。在该图中地震噪声以高概率取值的形式出现,并未因人工截除的地震体波与面波、仪器尖脉冲干扰、脉冲标定等而出现低概率值形式,不会影响对高概率水平下环境地震噪声水平的评估。通过 PDF 图还可以检测记录系统的故障和全面评判台站的数据质量。

2 福建地区地震噪声观测资料与处理

2.1 地震噪声资料收集与预处理

福建省测震台网由原先的 41 个测震台站和《十一五》新建的 44 个测震台站组成,图 2 给出了福建省这 85 个测震台站的分布。本文所研究的地震噪声资料是福建省 85 个测震台站 2012 年 1~12 月噪声的垂直向记录,采样频率为 100Hz(李军等,2011),其中大部分仪器所记录的频段在 $1/60 \sim 50$ Hz 之间。考虑到频段前后会出现一定的衰减,所以本文设定 PSD

值的频率取值范围为 1/50 ~ 40Hz。

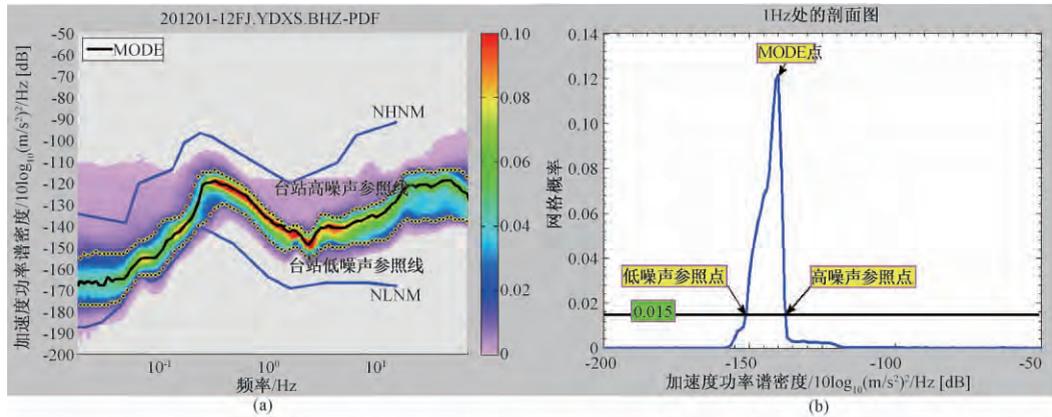


图1 功率谱概率密度函数(PDF)分布图。(a)利用台站1年的噪声数据计算出来的PDF图,点线为确定的高、低噪声参照线;(b)对应三维PDF图中1Hz频点处的功率谱密度概率分布图

福建台网的地震记录通常以 EVT 格式或 SEED 格式存储,数值的单位为 counts。使用时都需要对数据做如下处理,其中地动速度(李军,2007)的计算公式为

$$\text{输出地动速度 } V(\mu\text{m/s}) = \frac{\text{输入振幅值 } A(\text{counts})}{\text{速度响应灵敏度 } K(\text{counts}/\mu\text{m/s})} \quad (1)$$

对一些漂移的波形采用最小二乘法作基线校正,具体公式为

$$v^*(t) = v(t) - at - b \quad (2)$$

式中 $v(t)$ 为未校正的地面速度记录, $v^*(t)$ 为校正后的地面速度记录,参数 a 、 b 是对每条记录 $v(t)$ 进行最小二乘拟合求得的,其计算公式为

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{n \sum_{i=1}^n t_i v_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n v_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \\ b &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i - \frac{a}{n} \sum_{i=1}^n t_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2 地震噪声功率谱计算过程

利用噪声记录计算噪声功率谱的数据处理过程主要步骤如下:

(1) 记录段的选取。对1年期的噪声记录以每5分钟(300s)进行分段,且为了避免 PSD 值的变化过大,对每段记录间按 50% 的叠加率选取。记录段长度 T_r 取决于我们感兴趣信号的最长周期 T_L ,通常 T_r 的取值需达到 T_L 的 6 倍以上(Bormann,2002)。因此取记录段长度 300s,可以满足反映 50s 低频地震噪声 PSD 值的需要。

(2) 速度功率谱密度值估算。最常用的估算地震噪声 PSD 值的方法是直接傅里叶变换法。该方法通过计算有限长度数据序列的 FFT 变换来计算 PSD 值。为了得到以频率为自变量的 FFT 变换,可以将数据序列表示为

$$Y(f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} y(n\Delta t) e^{-i2\pi f n \Delta t} \quad (4)$$

式中, $f = k/N\Delta t$ ($k = 0, 1, \dots, N-1$); N 为采样点个数; Δt 为采样时间间隔。 $y(n\Delta t)$ 是每段原始噪声记录在时域中的数据系列, $Y(f)$ 是傅里叶变换得到的振幅谱。

功率谱反映了信号的能量随频率的分布情况, 功率谱与傅里叶振幅谱二者在本质上并无多大不同, 只是功率谱的纵坐标大体上相当于傅里叶振幅谱纵坐标的平方, 其表达式为

$$PSD_v(f) = \frac{2}{N\Delta t} |Y(f)|^2 \quad (5)$$

(3) 加速度功率谱密度的计算。当频率为 f 时, 速度功率谱密度 PSD_v 与加速度功率谱密度 PSD_a 的转换公式为

$$PSD_a(f) = 4\pi^2 f^2 PSD_v(f) \quad (6)$$

其中: PSD_v 的单位为 $(\text{m/s})^2/\text{Hz}$; PSD_a 的单位为 $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 。

(4) 平滑处理。为了得到 PSD 在频率对数坐标中呈等间隔采样, 本文采用 1/3 倍频程积分作为平滑处理

$$PSD_a(f_c) = \frac{1}{n} \sum_{f=f_l}^{f_h} PSD_a(f) \quad (7)$$

其中, $f_l = 2^{-1/6} f_c$ 为低频拐角频率; 为 $f_h = 2^{1/6} f_c$ 高频拐角频率; n 为介于二者之间频率 f 的个数。由 (7) 式得到中心频率 f_c 的 PSD_a 平均值 $PSD_a(f_c)$, 作为 f_c 的加速度功率谱密度的 PSD 值。中心频率 f_c 以 1/9 倍频程为增加步长, 即下一个中心频率 $f_c = 2^{1/9} f_c$, 重新计算相应的 f_l 和 f_h , 然后将新的 f_l 与 f_h 之间的 PSD 值平均值作为下一个中心频率 f_c 的 PSD 取值。这样在 f_c 的取值范围 0.02 ~ 40Hz 内, 每个记录段的 PSD 值随频率变化情况可由在对数坐标系呈等间隔采样的 107 个中心频率的 PSD 值来表示 (图 3)。

2.3 PDF 图上确定台站高、低噪声参照线

每个中心频率 f_c 的 PSD 概率密度函数为

$$P_{PSD}(f_c) = N_{pf_c} / N_{f_c} \quad (8)$$

其中, N_{f_c} 为 f_c 频点的记录段总数; N_{pf_c} 为 f_c 频点的 PSD 值落在某 PSD 取值范围内的记录段个数, 在本研究中 PSD 窗长与步长都取 1dB, 变化范围为 -200 ~ -50dB。然后, 以频率为横坐标、以 PSD 为纵坐标、以 $P_{PSD}(f_c)$ 色块颜色深浅绘制三维平面图, 得到功率谱概率密度函数 (PDF) 分布图 (图 1(a)), 不同色块代表某频点在一定 PSD 窗内功率谱概率数。

从 PDF 图中可以明显看出台站不同噪声水平所处的区域。如图 1(a) 所示, 颜色较深部分 (蓝、绿、黄、红区域) 是台站正常噪声水平落入的区域。颜色较浅部分 (粉红色区域) 是台站异常记录 (地震波、外界噪声) 所处的区域。为了能描绘出正常噪声所处的区域范围, 本文引进了台站高、低噪声参照线来表示该区域的上下限。首先, 选取蓝色轮廓作为正常噪声的界限, 由图 1(a) 右边的图例可以看到蓝色轮廓线所对应的网格概率是 1.5%。

针对图 1(a) 中 1Hz 处的加速度功率谱密度概率分布进行分析, 以功率谱密度值为横坐标, 网格概率为纵坐标, 画出对应 1Hz 频点的功率谱密度概率图 (图 1(b))。以最大网格概率点为中心, 向左、右两边分别找首个网格概率 $\leq 1.5\%$ 的点, 用于确定低噪声参照点和高噪声参照点。对于其它频点采用同样方法确定高、低噪声参照点, 最终将这些点连接起来就得

到了台站网格概率 $\approx 1.5\%$ 的高、低噪声参照线(图 1(a))。

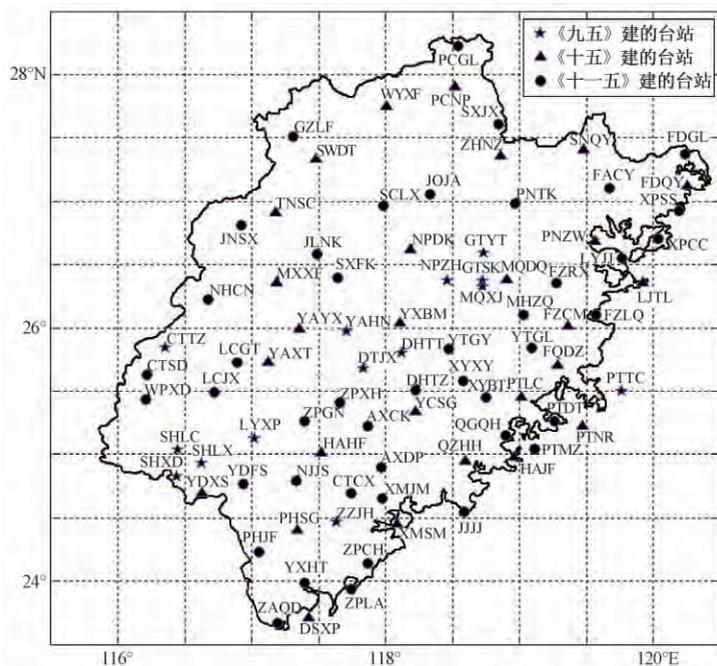


图 2 福建省 85 个测震台站分布图

3 噪声异常的分类与遴选方法

本文对噪声异常的遴选思路是利用台站过去 1 年的历史记录绘出台站 PDF 模型,由该模型确定出台站的高、低噪声参照线,然后将实时计算的 *PSD* 线与高、低噪声参照线进行比较,实现噪声异常自动化遴选。

根据 PDF 图可以直观的判断噪声是否发生异常。为了便于研究噪声异常的自动化挑选,本文将噪声异常大致进行了分类,分类规则如下:PDF 图上显示的异常分布在低噪声参照线附近及以下,属于低噪处异常;PDF 图上显示的异常分布在高噪声参照线附近及以上,属于高噪处异常;PDF 图上显示介于高、低噪声参照线之间的异常,则属于中噪处异常;除此之外,缺数异常也是常见的一种噪声异常,一般都没有数据,在 PDF 图上无法显示,所以本文直接在时域上对其进行挑选。挑选方法:若所有点都小于 1.0×10^{-10} m/s(由于正常噪声速度记录一般为 1.0×10^{-6} m/s 左右),则判定为缺数异常。由于噪声异常具有不定性和多样性,那么只用一种挑选方法是无法完成对噪声异常的挑选,通过上述对噪声异常的分类,然后研究针对每个类型的挑选方法,就可以很好地解决这一难题。

3.1 低噪处异常的挑选

对低噪处异常可以很容易从 PDF 图中判断出来。选取造成低噪声异常的某条记录波形,并绘出该波形的 *PSD* 线(图 3(a),实线),图中虚线是由台站低噪声参照线全体向下移动 3dB 所得到的线,如此做法是考虑在确定台站低噪声参照线时存在误差影响。挑选方法:若 *PSD* 线(实线)低于虚线的点数占总点数的百分比大于 0.45(根据大量数据统计出来

的阈值),则判定为低噪声异常。

3.2 高噪声异常的挑选

从 PDF 图中也可以很容易判断出高噪声异常,对造成高噪声异常的某条波形,并绘出该波形的 PSD 线(图 3(b),实线),从图 3(b)中可以看出,该类异常的特征为 PSD 值大于台站高噪声参照线。同样考虑在确定台站高噪声参照线时存在误差影响,则由台站高噪声参照线全体向上移动 3dB 而得到虚线。挑选方法:若 PSD 线(实线)超出虚线的点数占总点数的百分比大于 0.45,则判定为高噪声异常。

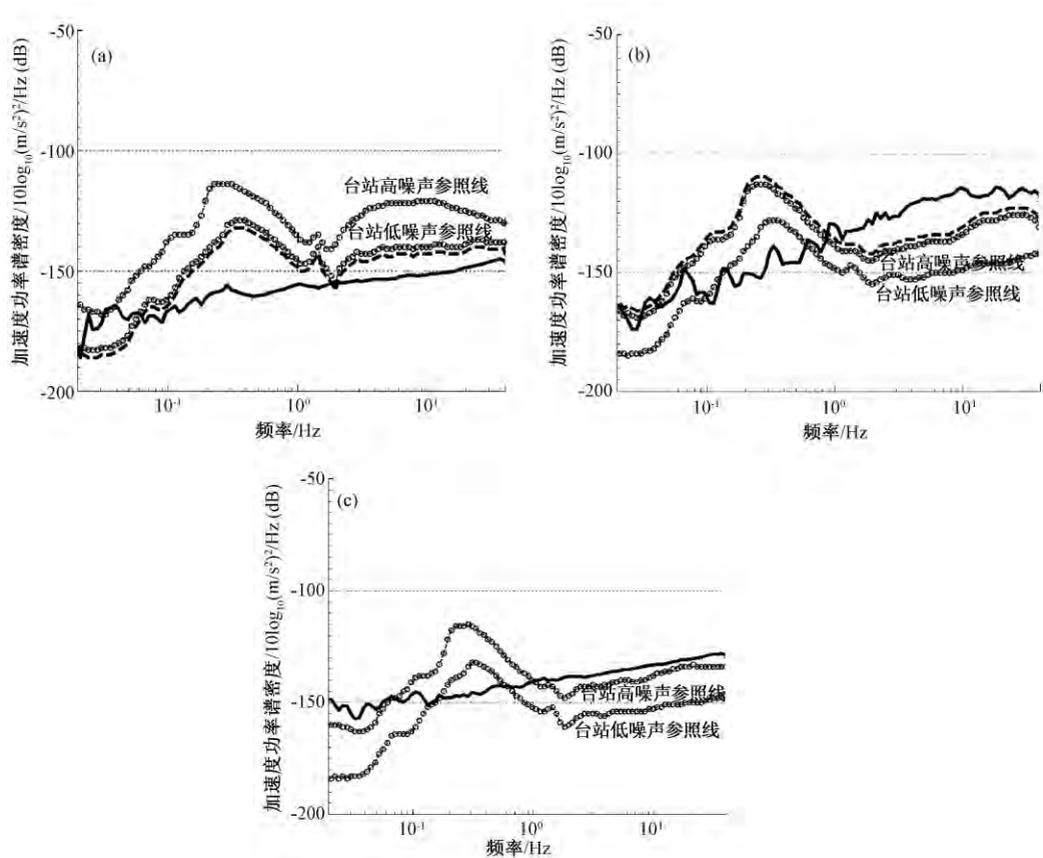


图 3 噪声异常挑选方法示意图。(a)低噪声异常中 5 分钟一小段噪声记录计算出来的 PSD 线与台站低噪声参照线的比较;(b)高噪声异常中 5 分钟一小段噪声记录计算出来的 PSD 线与台站高噪声参照线的比较;(c)中噪声异常中 5 分钟一小段噪声记录计算出来的 PSD 线的特征

3.3 中噪声异常的挑选

同样可利用 PDF 图判断出中噪声异常,选取造成中噪声异常的某条波形,绘出该波形的 PSD 线(图 3(c),实线),从图 3(c)中可以看出,该类异常的特征是 PSD 线起伏不大,几乎成一条直线。由于正常噪声的 PSD 线起伏较大,那么它所对应的方差也较大,这样可以通过比较两者方差的不同来挑选出该类异常。挑选方法:先用最小二乘法对 PSD 线作倾斜校正,再求校正后的 PSD 线的方差。若方差 < 3 ,则判定为中噪声异常。

3.4 挑选结果

若要将上述方法运用到实际监测中就需将其按一定的次序整合起来,本文给出了地震噪声实时监测系统流程图(图4),根据该流程图用 Matlab 编写了对应的挑选程序。选取福建省 85 个测震台站 2013 年 7 月份的噪声记录数据进行验证,依据图 4 所示的系统流程分别对 85 个台站的噪声数据进行在线运行。运行结果如图 5 所示,横坐标表示福建省 85 个台站,纵坐标表示每个台站应用地震噪声实时监测系统所挑选出来属于异常波形的个数与所挑选出来的波形总数的百分比,图中每个点表示一个台站所识别出来异常的正确率。从图 5 中可以看出 85 个台站识别出来的异常正确率均在 90% 以上,多数台站达到 100%。这是因为噪声一旦发生异常,那么其对应的功率谱密度 PSD 值也是异常的,这样利用台站高、低噪声参照线作为参考标准就可以很容易的将异常挑选出来。

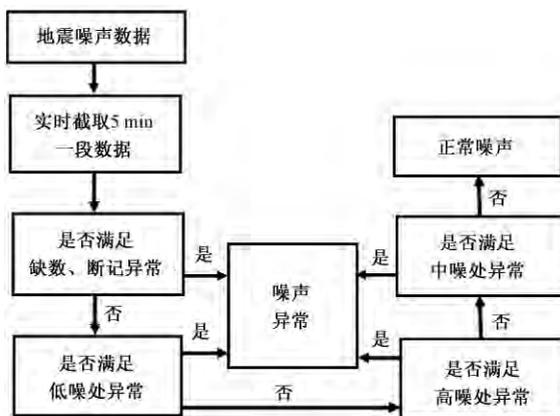


图 4 地震噪声实时监测系统流程图

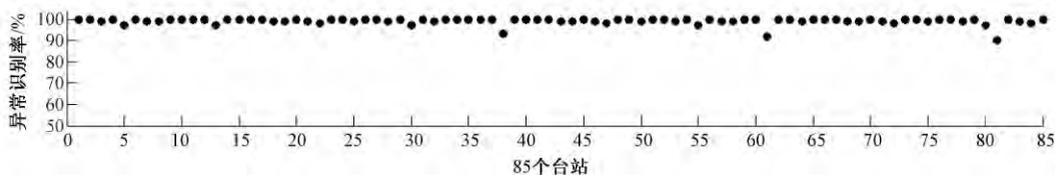


图 5 选取 2013 年 7 月份噪声记录对福建省 85 个台站进行测试的结果

4 结论与讨论

本文利用台站 1 年期的历史记录绘出台站 PDF 模型,然后由该模型确定出台站的高低噪声参照线,再根据这两条线与实时计算的 PSD 线进行比较,实现噪声异常自动化挑选。该方法用于噪声实时监测可以取得很好的效果,大大减少了台网仪器系统异常检测的工作量,且能及时发现异常,并提醒台网工作者及时解决故障,保证记录到的地震数据质量优良。本文研究可以得到如下结论:

(1) 采用网格概率的方法来确定台站高低参照线并作为噪声异常遴选的标准,其中考虑了台站台基和仪器稳定性等复杂因素的影响,对研究台站本身噪声异常挑选具有很强的

适用性。

(2) 地震噪声实时监测系统对噪声异常的挑选正确率很高,且普遍适用于福建省 85 个台站。

(3) 通过噪声异常在 PDF 图上所分布的区域不同,将噪声异常分成缺数(断记)异常、低噪处异常、中噪处异常、高噪处异常等 4 类,其中囊括了绝大部分异常。高噪处异常较为复杂,包括了仪器异常、地震波、外界噪声、系统瞬变等异常,这些异常有些是非仪器异常引起的,需要进一步研究对它们的区分方法。

(4) 通过大量数据统计,给出高、低噪声异常挑选方法的阈值,这为以后新建台站的异常挑选提供了可行的参照标准。通过该参照标准可以很好解决新建台站历史数据不足的问题。

参考文献

- 李军,2007,福建地区脉动资料的处理与分析,硕士学位论文,中国地震局工程力学研究所。
- 李军、金星、鲍挺,2011,利用噪声记录估计福建地区中小地壳体波速度结构,中国地震,27(3),226~234。
- 廖诗荣、陈绯雯,2008,应用概率密度函数方法自动处理地震台站勘选测试数据,华南地震,28(4),82~92。
- 徐嘉隽、廖诗荣、张红才,2010,福建测震台网观测数据质量检测软件研究,华南地震,30(4),97~104。
- Bormann P, 2002, New Manual of Seismological Observatory Practicice, Geo Forschungs Zentrum Potsdam,4(11),5~7.
- McNamara D E, Buland R P, 2004, Ambient Noise Levels in the Continental United States, Bull Seism Soc Am, 94(4),1517~1527.
- McNamara D E, Boaz R I, 2005a, Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package, USGS Open File Report, 28(6), 1426~1438.
- McNamara D E, Buland R P, 2005b, An Assessment of Seismic Noise Levels for the Advanced National Seismic System Backbone Network and Selected Regional Broadband Stations, USGS Open File Report,10(77),27~43.
- Peterson J, 1993, Observations and Modeling of Seismic Background Noise, USGS Open File Report,18(12),93~322.
- Sleeman R, 2007, Towards an automated Quality Control Manager for the Virtual European Broadband Seismograph Network, Orfeus Newsletter, 7(1),5~16.

Real-time monitoring of abnormal seismic noise

Lin Binhua^{1,2)} *Jin Xing*^{1,2,3)} *Liao Shirong*¹⁾ *Li Jun*¹⁾ *Huang Lingzhu*¹⁾ *Zhu Gengqing*¹⁾

1) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

2) Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

3) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract This dissertation used the noise data in vertical recording during 2012 as the research object. We divided the noise records to 5min short segment, calculated the power spectral of each segment, and drew PDF diagram by using probability distribution functions. We then determined the station of the high or low noise reference line using the method of the grid probability. Then on the basis of the anomalies of the station in the PDF, the abnormal noise were divided into four categories: dropped packets abnormal, low noise abnormal, high noise abnormal, median noise abnormal. Four selection methods were found by the station of the high or low noise reference line, and real-time monitoring system of seismic noise was formed by combining four selection methods. Noise records of 85 seismic stations in Fujian Province in July 2013 was selected to verify. The results show that noise-recognition of most station anomalies can reach 99%. As the average error rate is less than 1%, the effect of selection is very good. Therefore, the method can be applied to station noise in real-time monitoring.

Key words: Seismic noise PSD PDF Power spectrum Abnormity Data quality