

利用同台址地脉动记录检测井下地震计水平向方位角^{*}

李少睿, 惠少兴, 董平江

(陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘要: 利用波形相关法对地面同台址多套地震计方位角进行对比分析研究, 并在江苏盐城、安徽界首、安徽合肥、安徽阜阳、河南航海5个台进行井下地震计方位角对比检测, 同时利用远震P波极性法对地面及井下地震计方位角的检测结果进行验证。结果表明: 地面观测台站地震计方位角检测中波形相关法、远震P波极性法与陀螺寻北仪检测结果的偏差分别在 0.4° 、 2.9° 以内, 井下观测台站地震计方位角检测中波形相关法与远震P波极性法检测结果的偏差在 5.5° 以内。因此, 远震P波极性法及波形相关法均可得到较为满意的检测结果。

关键词: 井下地震计; 方位角偏差; 波形相关; 远震P波极性法

中图分类号: P315.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)01-0071-08

0 引言

随着工业化、城镇化的推进, 各种人为噪声不断增加, 地面观测已远远不能满足监测预报及科研工作的需要, 而深井观测则可以有效地减弱各种地面噪声干扰, 大大提高对微小地震的监测能力。目前全国测震台网在网运行的深井观测台站接近200个, 井下地震计安装时水平向方位基本采用磁通门、陀螺仪等设备定向, 由于受外界环境、定向设备精度、地震计底座固定等因素的影响, 井下地震计实际方位角与安装时确定的方位角偏差较大。因此, 地震计方位角的精确定向对剪切波分裂、接收函数和面波等的研究具有重要意义。

目前井下地震计方位角检测通常借助于远震、地脉动记录(李少睿等, 2012, 2016; 吕永清等, 2007; 谢剑波, 2014)等资料确定; Aster和Shearer(1991)认为使用近震初至P波质点运动, 可使井下地震计水平向定向达到 5° 的精度; Niu和Li(2011)利用多事件方法估算了中国地震台网850多个地震台站的仪器方位角, 共鉴别出有270个台站在方位角、极性等方面存在问题; 陈继锋等(2016)利用甘肃省测震台网远震资料对所属的44个台站地震计方位角进行了检核计算; 周琳等(2013)分析了鄂尔多斯地块周缘24个台站记录的73个7级以上远震事件, 得到的地震台站地震计平均方位偏差与Niu和Li(2011)的结果基本一致。但是利用远震、地脉动记录等确定的井

下地震计方位角一致性如何, 结果是否可信, 还没有定论。本文使用波形相关法, 对地面台站方位角已知的地震计组合进行对比测试, 同时利用同台址地面与井下地震计组合对井下地震计方位角进行检测, 并利用远震P波极性法进行验证, 分析检测结果的可靠性。

1 深井观测台站概况

本文选取了江苏盐城, 安徽界首、合肥、阜阳, 河南航海5个井下观测台站进行检测, 台站信息见表1, 选取台站观测仪器涵盖全国测震台网在网运行的短周期、宽频带、甚宽频带井下地震计。这5个台站地处市内或近郊, 台站环境地噪声水平高, 地面与井下地噪声水平相差较大, 有一定代表性。

2 计算方法

2.1 波形相关法

测试中利用2台地震计进行同台址地脉动记录测试, 其中一台为参考地震计, 参考地震计方位角由陀螺寻北仪测定, 一台为测试地震计, 分析时利用式(1)(2)对测试地震计记录按照一定角度等间隔进行坐标旋转, 用式(3)分别计算各旋转角度参考地震计的2个水平分量与测试地震计2个水平分量的相关系数, 相关系数最大时所对应的旋转角度即为测试地震计相对参考地震计的方位角, 具体公式如下:

^{*} 收稿日期: 2019-03-28.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1503205)资助.

表 1 深井地震台站基本信息
Tab. 1 The fundamental information of borehole seismic stations

序号	台名	代码	台基岩性	场地类型	井深/m	地震计型号	频带范围	数采型号	采样率/Hz	投入运行时间
1	盐城	YC	砂岩	深井	-445	CMG-3TB	120 s~50 Hz	CMG-DM24	100	2008-01
2	界首	JSO	松散沉积层	深井	-372	JDF-2	20 s~50 Hz	EDAS-24IP	100	2011-03
3	合肥	HEF	砂岩	深井	-51	CTS-1B	120 s~50 Hz	EDAS-24GN	100	2013-03
4	阜阳	FYT	松散沉积层	深井	-272	FSS-3DBH	2 s~50 Hz	EDAS-24IP	100	2007-10
5	航海	HH	松散沉积层	深井	-450	FSS-3DBH	2 s~50 Hz	EDAS-24IP	100	2007-02

$$x = x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi \tag{1}$$

$$y = -x_1 \sin \varphi + y_1 \cos \varphi \tag{2}$$

$$R_{xx'} = \frac{\sum (x - \bar{x})(x' - \bar{x}')}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (x' - \bar{x}')^2}} \tag{3}$$

式中： x_1, y_1 分别为测试地震计 EW 和 NS 向数据； x, y 分别为旋转 φ 角度后 EW 向和 NS 向数据； x' 和 y' 分别为参考地震计 EW 向和 NS 向数据； $R_{xx'}$ 为 x 与 x' 的相关系数， $R_{yy'}$ 同理。

2.2 地震观测记录的仿真

地震观测记录的仿真采用下式：

$$Y_1(\omega) = H_1(\omega)Y(\omega)/H(\omega) \tag{4}$$

式中： $Y(\omega)$ 为地震记录的傅里叶谱； $H(\omega)$ 为地震观测系统的频率响应函数； $H_1(\omega)$ 为需仿真的地震观测系统的频率响应函数； $Y_1(\omega)$ 为仿真记录的傅里叶谱，对 $Y_1(\omega)$ 作傅里叶逆变换可得到仿真记录。

笔者在陕西省测震台网 QLIT 台进行了宽频

带地震记录仿真到短周期地震记录的检验。在同一仪器墩上架设 BBVS-60 宽频带地震计和 FSS-3M 短周期地震计，数据采集器使用 EDAS-24IP，采样率为 100 sps，采用最小相位滤波，转换因子为 1.589 $\mu\text{V}/\text{count}$ 。BBVS-60 宽频带地震计传递函数见式 (5)，FSS-3M 短周期地震计传递函数见式 (6)：

$$H(s) = \frac{K \cdot A_0 \cdot s^2}{(s^2 + 0.148\,07s + 0.010\,966)(s^2 + 355.38s + 63\,165)} \tag{5}$$

式中： $K = 2\,000\text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ； $A_0 = 63\,165$ 。

$$H_1(s) = \frac{K \cdot A_0 \cdot s^2}{(s + 575.168)(s^2 + 4.422\,2s + 9.869\,6)(s^2 + 458.864s + 234\,936)} \tag{6}$$

式中： $K = 2\,000\text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ； $A_0 = 1.350\,2 \times 10^8$ 。

应用式 (4) ~ (6)，即可实现 BBVS-60 宽频带地震记录仿真到 FSS-3M 短周期地震记录，从图 1 可以看出，仿真后的记录与 FSS-3M 短周期实际记录波形基本一致。

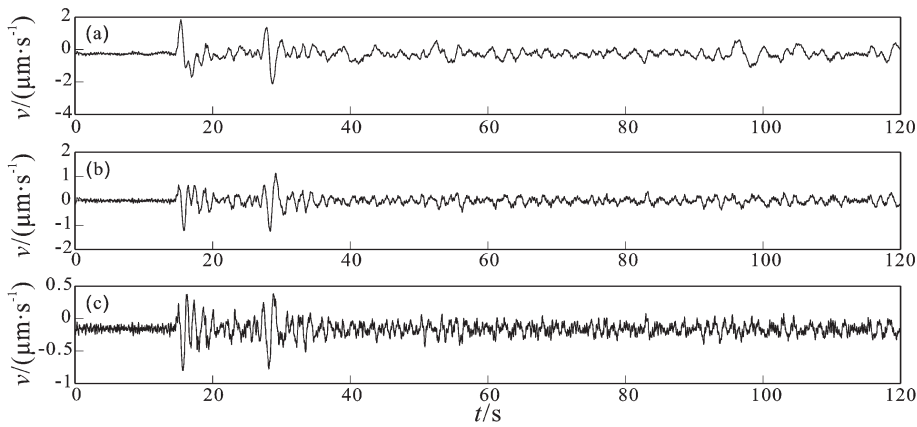


图 1 UD 向 BBVS-60 宽频带地震记录 (a)、仿真 FSS-3M 短周期地震记录 (b) 及 FSS-3M 短周期实际记录 (c)

Fig. 1 The broadband seismic data of BBVS-60 in the UD direction (a), simulation short period data of FSS-3M (b) and measured short period data of FSS-3M (c)

2.3 远震 P 波极性法

远震 P 波极性法是基于在均匀成层介质中传播的 P 波开展的, 其运行轨迹应在包含震源与接收台站的垂直平面内, P 波能量集中在径向分量上, 切向分量上没有能量。假设地震计方位角为 φ , 入射 P 波的后方位角为 θ_a , 理论计算的入射 P 波后方位角为 θ_c , 后方位角 baz : $\theta_c = \theta_a + \varphi$, 地震计方位角示意图 2。对每一地震事件的水平分量进行旋转后得到径向和切向分量, 然后计算所有事件切向分量中的 P 波能量加权和, 搜索角度空间 φ 使切向分量叠加后的 P 波能量达到最小值时, 即得到台站地震计的方位角。

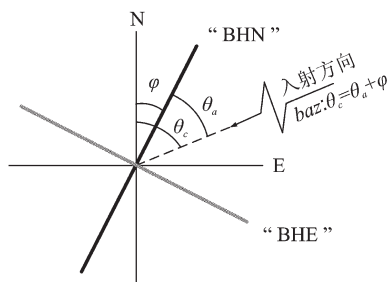


图2 地震计方位角示意图 (N, E 为台站观测墩处的地理北和东方向, BHN 和 BHE 为地震计的北和东方向)

Fig. 2 Schematic map of seismometer azimuth (N and E are geographical north and East in the station observation pier, BHN and BHE are the north and east directions of the seismometer)

3 计算结果和对比分析

3.1 地面观测台站观测数据对比分析

为对波形相关法、远震 P 波极性法在地震计方位检测中的适用性、一致性进行分析,本文用 2 种方法对测试地震计方位角进行计算。

3.1.1 波形相关分析

地面观测台站选定陕西省测震台网 QLIT, HZHG, XAN, ZOZT 等 4 个台进行对比分析, QLIT 和 ZOZT 台为 BBVS - 60 宽频带地震计, HZHG 和 XAN 台为 CTS - 1EF 甚宽频带地震计。分别在这 4 个台站同仪器墩安装相同带宽的地震计作为参考地震计, 数据采集器全部使用 EDAS - 24IP, 采样率为 100 sps, 采用最小相位滤波, 转换因子为 $1.589 \mu\text{V}/\text{count}$ 。参考地震计使用 NV - NF301 型陀螺寻北仪进行定向, 方位角数据见表 2, 连续波形数据记录 12 h 以上, 对记录数据进行相关分析。由表 3 可见, 4 个台的 10 次测试结果基本一致, QLIT 台 NS 向极性反向, QLIT1 为 NS 向数据经人工校正后的结果, QLIT2 为对地震计 NS 向信号线经过改正后的结果。由于每个台站测试时, 参考与测试地震计带宽相同, 且 2 套仪器架设在同一仪器墩上, 因此计算时直接使用地震记录进行对比分析。

表2 地面参考地震计方位角

Tab. 2 Azimuth of surface referenced seismometer

序号	台站/仪器型号	方位角/ (°)	序号	台站/仪器型号	方位角/ (°)
1	QLIT /BBVS -60_CK	0.1	6	YC /CMG -40T_CK	-0.2
2	QLIT /FSS -3M_CK	0.1	7	JSO /CMG -40T_CK	0.5
3	HZHG /CTS -1EF_CK	0.1	8	HEF /CTS -1EF_CK	1.7
4	XAN /CTS -1EF_CK	0.1	9	FYT /CMG -40T_CK	-0.3
5	ZOZT /BBVS -60_CK	-0.2			

表3 地面观测台站同仪器墩宽频带地震计方位角检测结果

Tab.3 The broadband seismometer detection results of the surface seismic observation station on the same instrument frusta 单位: ($^{\circ}$)

[illegible]

笔者在陕西省测震台网 QLIT 台进行了同仪器墩宽频带与短周期地震计组合的测试。宽频带地震计使用 BBVS-60 宽频带地震计,方位角为 0.3° ,在同仪器墩安装 FSS-3M 短周期地震计,方位角为 0.1° 。从表 4 的分析结果来看,未仿真计算结果:相关系数为 0.985 8,相对方位偏差为 0.8° ,经 BBVS-60 地震计方位角校正后为 1.1° ;仿真计算结果:相关系数为 0.996 8,相对方位偏差为 -0.5° ,经 BBVS-60 地震计方位角校正后为 -0.2° ,综合分析认为仿真结果优于未仿真结果。

表 4 QLJT 台同仪器墩宽频带与短周期地震记录分析结果

Tab.4 The analysis results of the broadband seismic data and short period seismic data on the same instrument frusta of QLJT station

序号	未仿真计算结果		仿真计算结果		两种方法计算结果差/ ($^{\circ}$)
	方位偏差/ ($^{\circ}$)	相关系数	方位偏差/ ($^{\circ}$)	相关系数	
1	0.7	0.986 3	-0.4	0.997 8	1.1
2	0.7	0.986 0	-0.5	0.997 5	1.2
3	0.7	0.985 6	-0.5	0.997 0	1.2
4	0.7	0.986 3	-0.5	0.996 9	1.2
5	0.5	0.983 4	-0.4	0.996 2	0.9
6	0.8	0.986 0	-0.5	0.996 9	1.3
7	1.2	0.986 0	-0.5	0.997 2	1.7
8	1.0	0.985 9	-0.5	0.996 8	1.5
9	0.9	0.986 3	-0.5	0.996 6	1.4
10	0.6	0.984 9	-0.4	0.996 0	1.0
11	1.0	0.985 0	-0.5	0.996 2	1.5
12	0.6	0.985 4	-0.5	0.995 8	1.1
13	1.1	0.985 3	-0.5	0.996 5	1.6
14	0.9	0.985 4	-0.4	0.996 6	1.3
15	0.5	0.986 5	-0.4	0.996 6	0.9
16	0.7	0.987 2	-0.5	0.996 8	1.2
17	0.7	0.986 8	-0.5	0.996 8	1.2
18	0.7	0.986 6	-0.5	0.997 3	1.2
均值	0.8	0.985 8	-0.5	0.996 8	1.3

注:序号 1~18 表示使用了 18 个小时记录数据进行分析。

3.1.2 远震 P 波极性分析

对 2011 年 1 月—2013 年 7 月陕西省测震台网记录的 $M_w \geq 5.0$ 、震中距为 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的地震事件

进行远震 P 波极性分析,4 个台站地震计方位偏差远震记录计算结果时间序列见图 3。从表 5 统计情况来看,远震 P 波极性分析的计算结果与仪器方位角普查陀螺寻北仪检测的结果有一定偏差,最大达 2.9° ;陀螺寻北仪检测的结果与波形相关分析得到的结果偏差较小,在 0.4° 以内。使用远震 P 波极性分析得出的 HZHG 台方位偏差为 -8.5° ,与周琳等(2013)给出的 -10.8° 以及 Niu 和 Li(2011)给出的 -9° 基本一致,但与仪器方位角普查及波形相关分析的结果有一定的偏差。远震 P 波极性分析相对波形相关分析结果偏差较大,这是由于远震 P 波极性分析方法得到的地震计方位角,受台站下方介质各向异性、速度的横向不均匀性以及倾斜界面等因素的影响,但总体来讲,3 种方法确定的方位角数据均比较可信。

表 5 台站地震计方位偏差结果统计

Tab.5 Statistics of deviation of the seismometer azimuth			
台站	仪器方位角普查方位偏差/ ($^{\circ}$)	波形相关分析方位偏差/ ($^{\circ}$) / 相关系数	远震 P 波极性分析方位偏差/ ($^{\circ}$)
QLIT1	0.3	0.5/0.999 9	0.9
QLIT2	0.3	0.6/0.999 8	0.2
HZHG	-5.8	-5.9/0.999 8	-8.5
XAN	-0.9	-0.9/0.999 9	2.0
ZOZT	0.8	0.4/0.999 8	1.7

3.2 同台址地面多套地震计与井下地震计观测数据对比分析

选定河南省测震台网 HH 台进行对比分析。HH 台为深井观测台站,架设 FSS-3DBH 短周期地震计,数据采集器为 EDAS-24IP,采样率为 100 sps,采用最小相位滤波,转换因子为 $1.589 \mu V/\text{count}$ 。台站地处市内区域,人为干扰较大,经计算井下 450 m 处于Ⅲ级环境地噪声水平,地面处于 V 级环境地噪声水平。测试时在距观测井 15 m 处分别架设 2 套 BBVS-60 宽频带地震计、1 套 CMG-40T 宽频带地震计、1 套 FSS-3M 短周期地震计,FSS-3M 短周期地震计使用 EDAS-24IP 数据采集器,采样率为 100 sps,采用最小相位滤波,转换因子为 $1.589 \mu V/\text{count}$,其它 3 套地震计均使用 EDAS-24GN 数据采集器,采样率 100 sps,最小相位滤波,转换因子为 $1.192 \mu V/\text{count}$ 。

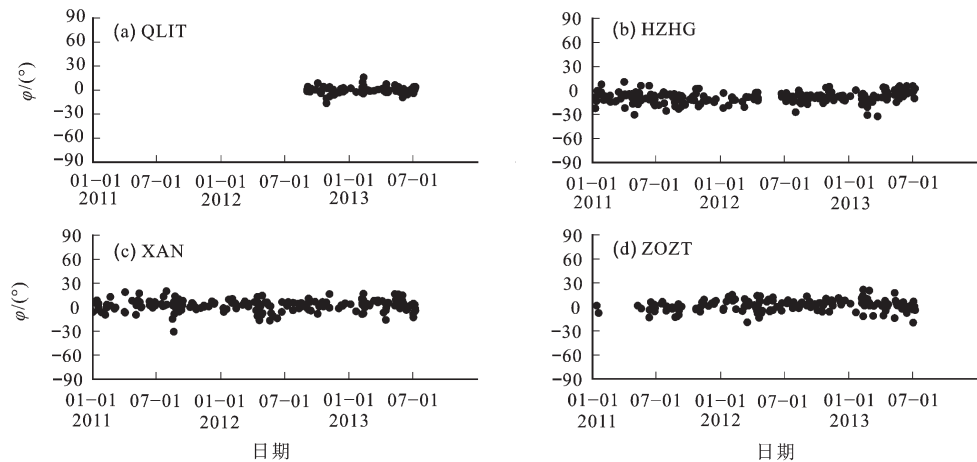


图 3 地面观测台站地震计方位偏差远震记录计算结果时间序列

Fig. 3 The time series of the calculated results of seismometer azimuth deviation based on teleseism data in the surface seismic observation stations

参考地震计安装时，由于室内没有仪器墩，测试地震计在室外土层场地安装，挖除表层松散回填土，放置 40 cm × 40 cm × 1 cm 花岗岩板，石板与土层紧密结合，地震计安装于石板上，地震计方位角由陀螺寻北仪测定，4 套参考地震计方位角均为 0°，地面观测系统连续记录 24 h 以上，分析 4 套地震计与井下地震计组合 24 h 数据，相关分析时采用 0.2 ~ 0.3 Hz 带通滤波（李少睿等，2016），其中地面 BBVS - 60 宽频带地震计、CMG - 40T 宽频带地震计记录仿真到 FSS

- 3DBH 短周期地震记录，计算结果见表 6，7。对 2011 年 1 月—2013 年 7 月 HH 台记录的 $M_w \geq 5.0$ 、震中距为 30° ~ 90° 的地震事件进行远震 P 波极性分析，台站地震计方位偏差远震记录计算结果时间序列见图 4，计算结果见表 7。从表 6，7 中可以看出，4 套地震计组合得出的井下地震计方位偏差基本一致，其中远震 P 波极性分析结果与相关分析的结果偏差较大，除 3.1.2 列出的影响因素外，HH 台井下地震计为短周期地震计也是因素之一。

表 6 HH 台同台址多套仪器地震记录与台站井下短周期地震记录分析结果

Tab. 6 The analysis results of multigroup instruments seismic data in the same surface station and borehole short period seismic data in HH station

单位：(°)

方位偏差					方位偏差				
序号	BBVS - 60_1 /FSS - 3DBH	BBVS - 60_2 /FSS - 3DBH	CMG - 40T /FSS - 3DBH	FSS - 3M /FSS - 3DBH	序号	BBVS - 60_1 /FSS - 3DBH	BBVS - 60_2 /FSS - 3DBH	CMG - 40T /FSS - 3DBH	FSS - 3M /FSS - 3DBH
1	1.5	1.6	1.6	0.9	14	1.9	1.8	2.1	1.2
2	1.8	1.6	1.5	1.0	15	1.7	1.6	1.6	1.0
3	1.5	1.5	1.5	0.7	16	2.3	2.2	2.3	1.7
4	1.5	1.3	1.2	0.6	17	2.1	2.1	1.9	1.3
5	2.0	2.0	2.0	1.5	18	2.1	2.2	2.0	1.6
6	2.0	1.9	1.9	1.1	19	2.3	2.2	2.2	1.8
7	2.1	1.8	1.9	1.6	20	2.3	1.7	1.6	1.2
8	1.8	1.8	1.7	1.2	21	2.2	1.9	2.0	1.5
9	1.5	1.4	1.4	0.6	22	1.0	1.7	1.6	1.0
10	1.9	1.8	1.7	1.2	23	4.3	4.2	4.3	3.9
11	1.6	1.3	1.3	0.6	24	2.3	2.8	2.7	2.1
12	1.3	1.2	1.1	0.4	均值	2.0	1.9	1.9	1.3
13	2.1	2.1	2.0	1.6					

表 7 同台址地脉动记录相关法及远震 P 波极性法
测定 HH 台井下地震计方位角结果

Tab. 7 The results of the borehole seismometer azimuth detection
of the HH station by the method of microtremors data correlation
and teleseism P - wave polarity at the same station

仪器组合	波形相关分析方位 偏差(°)/相关系数	远震 P 波极性分析 方位偏差/(°)
BBVS - 60_1/FSS - 3DBH	2.0/0.921 6	6.8
BBVS - 60_2/FSS - 3DBH	1.9/0.930 0	
CMG - 40T/FSS - 3DBH	1.9/0.928 4	
FSS - 3M/FSS - 3DBH	1.3/0.921 5	

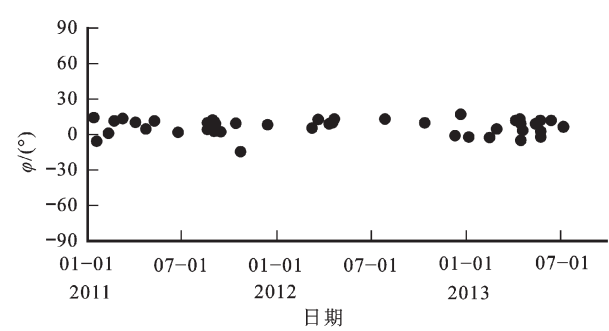


图 4 HH 台井下地震计方位偏差
远震记录计算结果时间序列

Fig. 4 The time series of the calculated results of
borehole seismometer azimuth deviation based
on teleseism data in the HH station

3.3 深井观测台站记录数据对比分析

3.3.1 波形相关分析

本次测试 JSO, FYT, YC 3 个台使用 CMG -

40T 宽频带地震计作为参考地震计,地震计安装于
台站观测室内;HEF 台使用台站地面观测仪器 CTS
- 1EF 甚宽频带地震计作为参考地震计。测试使用
EDAS - 24GN 数据采集器,采样率为 100 sps,最
小相位滤波,转换因子为 1.192 μV/count,台站地
面参考地震计方位角见表 2。JSO, FYT, YC,
HEF 台井下地震计信息见表 1,其中 EDAS - 24IP
数据采集器,采样率 100 sps,最小相位滤波,转
换因子为 1.589 μV/count;CMG - DM24 数据采
集器,采样率为 100 sps,最小相位滤波,转换因
子为 3.178 μV/count。参考地震计与井下地震计并行
观测 12 h 以上,进行记录数据相关分析,测定井
下地震计的方位角。

JSO, YC, HEF 3 个台,参考地震计与井下地
震计均为宽频带地震计,直接使用地震记录进行对
比分析,在相关分析时使用 0.2 ~ 0.3 Hz 带通滤波。
FYT 台地面参考地震计为宽频带地震计,井下地震
计为短周期地震计,分析时地面宽频带地震记录仿
真到 FSS - 3DBH 短周期地震记录,使用 0.2 ~ 0.3
Hz 带通滤波。以上 4 个台中,YC 和 HEF 台井下地
震计安装时没有进行定向,JSO 和 FYT 台均使用陀
螺仪进行了定向,但从表 8 可以看出,除 HEF 台
外,其余 3 个台站井下地震计方位角偏差都较大,
其中 YC 台为 155.1°,经地面参考地震计方位角校
正后为 154.9°;JSO 台为 -121.3°,经校正后为 -
120.8°;HEF 台为 -2.8°,经校正后为 -1.1°;FYT
台为 -89.4°,经校正后为 -89.7°。

表 8 深井观测台站井下地震计方位角检测结果

Tab. 8 The results of borehole seismometer azimuth detection of the borehole seismic observation stations 单位: (°)

台站	测量次数										平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
YC	155.1	155.3	153.8	154.8	155.2	155.3	155.3	154.7	156.2	155.3	155.1
JSO	-120.7	-121.2	-121.6	-121.1	-121.0	-122.1	-121.6	-120.8	—	—	-121.3
HEF	-2.9	-2.7	-2.9	-2.9	-2.7	-2.8	-2.8	-2.9	-2.8	-2.9	-2.8
FYT	-88.9	-90.4	-89.4	-89.9	-89.5	-89.5	-89.1	-88.7	-89.2	-89.7	-89.4

3.3.2 远震 P 波极性分析

对 2011 年 1 月—2013 年 7 月 JSO, YC, HEF,
FYT 这 4 个井下观测台站记录的 $M_w \geq 5.0$ 、震中
距为 30° ~ 90°地震事件进行远震 P 波极性分析,4
个台站地震计方位偏差远震记录计算结果时间序

列如图 5 所示。从表 9 的结果来看,对于井下地震
计,地脉动记录波形相关分析与远震 P 波极性分
析得到的井下地震计方位角基本一致,同样 FYT
台由于井下地震计为短周期地震计,远震记录的
分析结果偏差相对较大。

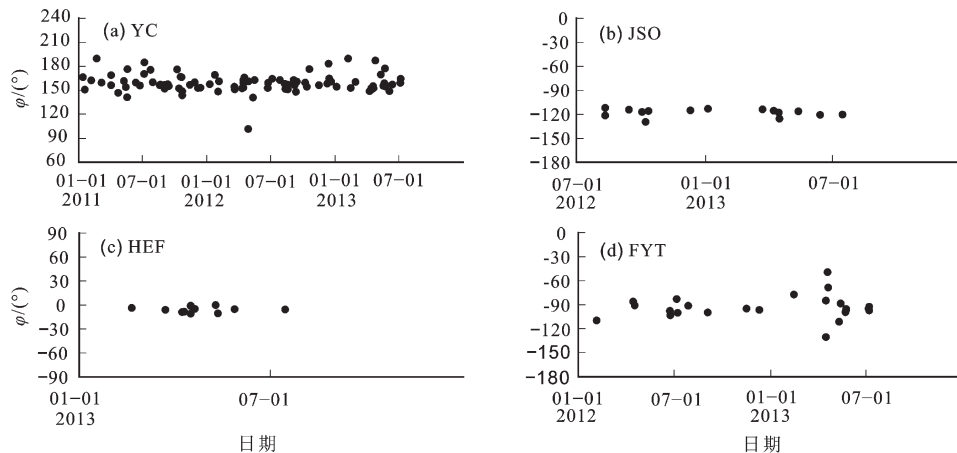


图 5 深井观测台站井下地震计方位偏差远震记录计算结果时间序列

Fig. 5 The time series of the calculated results of borehole seismometer azimuth deviation of the borehole seismic observation stations based on teleseism data

表 9 同台址地脉动记录波形相关法及远震 P 波极性法确定的井下地震计仪器方位角统计

Tab.9 The statistics of borehole seismometer azimuth determined by the method of microtremors data correlation and teleseism P - wave polarity at the same station

台站	波形相关分析	远震 P 波极性分析
	方位偏差 (°) / 相关系数	方位偏差 / (°)
YC	154.9/0.949 7	156.4
JSO	-120.8/0.920 3	-118.0
HEF	-1.1/0.997 2	-5.5
FYT	-89.7/0.934 8	-92.9

4 结论

本文通过使用波形相关法、远震 P 波极性法对地面及井下地震计方位角进行对比检测,得出以下结论:

(1) 由于井下地震计固定方法的缺陷,使用陀螺仪、磁通门等传统方法定向井下地震计方位角,实际定向结果不可靠。

(2) 地面、井下地震计方位角检测中波形相关法和远震 P 波极性法都可以得到较为满意的结果,其中波形相关法检测精度优于远震 P 波极性法,因此波形相关法可作为井下地震计安装时方位角的现场检测方法,远震 P 波极性法可作为台网中心日常检测地震计方位角的方法。

(3) 使用远震 P 波极性法检测井下地震计方位角,井下宽频带记录检测效果优于短周期记录。

中国地震局地球物理研究所郑秀芬研究员提供了远震数据,美国莱斯大学钮凤林教授提供检测程序,江苏省地震局卢永高级工程师、河南省地震局赵晖高级工程师在检测中给予协助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 陈继锋,李亮,李少睿,等. 2016. 甘肃省测震台网地震台站地震计方位角检验与校正[J]. 地震工程学报,38(3):460-465.
- 李少睿,董平江,罗治国. 2012. 测震仪器定向方法探讨[J]. 地震地磁观测与研究,33(5/6):250-254.
- 李少睿,毛国良,王党席,等. 2016. 井下地震计方位角检测技术应用研究[J]. 地球物理学报,59(1):299-310.
- 吕永清,蔡亚先,程骏玲. 2007. 确定地震计安装方位的相干性分析法[J]. 大地测量与地球动力学,27(4):124-127.
- 谢剑波. 2014. 地震记录的时间域反褶积、仿真及在地震计方位角相对测量中的应用[J]. 地球物理学报,57(1):167-178.
- 周琳,王庆良,崔笃信,等. 2013. 利用远震 P 波质点运动检核区域地震计水平分量方位[J]. 地震工程学报,35(2):326-333.
- Aster R C, Shearer P M. 1991. High-frequency borehole seismograms recorded in the San Jacinto fault zone, Southern California Part I Polarizations[J]. Bull Seismol Soc Am,81(4):1057-1080.
- Niu F L, Li J. 2011. Component azimuths of the cEArray stations estimated from P-wave particle motion[J]. Earthquake Science, 24(1):3-13.

Borehole Seismometer Horizontal Azimuth Detection by Using Microtremors Data at the Same Station

LI Shaorui, HUI Shaoxing, DONG Pingjiang
(*Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China*)

Abstract

In this study, a correlation analysis method was used to determine the azimuths obtained from several seismometers deployed at the surface from the same station, and the method was carried out at 5 borehole seismometers deployed in Yancheng, Jiangsu Province, Jieshou, Hefei, Fuyang, Anhui Province, and Hanghai, Henan Province. Meanwhile, we used the teleseism P – wave polarity method to verify the azimuth of the surface and borehole seismometer. The results show that the deviations of the waveform correlation analysis method and teleseism P – wave polarity method from the gyro north seeker detection results in the seismometer azimuth detection of surface seismic stations are within 0.4° and 2.9° , respectively. The deviation between the waveform correlation analysis method and the teleseism P – wave polarity method is within 5.5° in the seismometer azimuth detection of borehole seismic stations. Therefore, both the teleseism P – wave polarity method and the waveform correlation analysis method can obtain satisfactory results.

Keywords: borehole seismometer; azimuth deviation; waveform correlation; P – wave polarity method