

甘肃省测震台网地震台站地震计方位角检验与校正^①

陈继锋¹, 李亮¹, 李少睿², 刘白云¹, 陈晓龙¹

(1.中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2.陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘要:利用2007年8月—2013年9月甘肃省测震台网记录的549个 $M_s \geq 6$ 远震事件的P波资料, 对所属44个地震台站分量方位等问题进行检核计算。考虑到地震计维修、更换等因素, 提供了甘肃省测震台网地震台站按时间序列计算的方位角偏差及方位校正变化情况, 以保障测震台网数据的连续性与可靠性。研究表明, 反演的方位偏差与文献[1]的结果基本一致, 表明中国“十五”数字地震网络确实存在部分台站方位偏差较大等方面问题。因此, 在进行现代地震学研究中应充分考虑台站地震计方位误差较大和研究时间段内方位角变动等因素的影响。

关键词: P波质点运动; 检核; 地震计; 方位角; 甘肃台网

中图分类号: P315.78

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)03-0460-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.03.0460

Check and Correction of Seismometer Azimuth for Gansu Seismic Network Stations

CHEN Ji-feng¹, LI Liang¹, LI Shao-rui², LIU Bai-yun¹, CHEN Xiao-long¹

(1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2.Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: The orientation accuracy of three component station seismometers is very important for modern seismology research. Modern seismic studies rely heavily on precise three-component broadband observations. Similar to time travel, three dimensional particle motion is a key factor provided by a seismogram. It forms the basis of many functions, such as shear-wave splitting, receiver function, and surface and normal mode studies. Three component records are often rotated to isolate longitudinal, radial, and transverse motions. A critical parameter for performing rotation is the geographical orientation of the two horizontal components (BHN and BHE). Because the orthogonality between components of modern broadband instruments is accurate to a fraction of a degree, what really affects a correct rotation is the orientation of the BHN component, which could deviate from the true north direction. Knowledge of the orientations of the two horizontal components is thus important to perform a correction rotation. The particle motions of teleseismic P waves recorded by the network were analyzed and used to estimate the north component azimuth of each station. An SNR-weighted-multievent method was introduced to obtain component azimuths that best explain the P-wave particle motions of all the events recorded at a station. This method provides robust estimates including a measurement error calculated from background noise levels. In this study, the component azimuths of the seismic stations in Gansu province were rechecked using the P-wave particle motions of 549 $M_s > 6$ teleseismic events from August

① 收稿日期: 2015-05-07

基金项目: 中国地震局兰州地震所科技发展基金(2015Q04); 地震行业科研专项课题(201208009)

作者简介: 陈继锋(1978—), 男, 甘肃清水人, 高级工程师, 主要从事地震台网和地震学的研究工作。E-mail: chenjf163@163.com。

2007 to September 2013. Robust estimates were provided including a measurement error calculated for each station in the time series. The azimuths calculated in this study are very consistent with the results of Niu (2011), which implies that the stations of Gansu province have some problems with misorientation. The SNR-weighted-multievent method can be used to effectively check the seismometer stations horizontal azimuth deviations. Therefore, we provide deviation value of the azimuth including a measurement error calculated for each station in the time series to be taken into account for any rotation based seismic studies.

Key words: P-wave particle motion; check; seismometer; azimuth; Gansu Seismic Network

0 引言

现代宽频带地震计普遍采用一体化结构设计,三分量的传感器正交安装在一个底盘上且偏差小于 1° ,地震计之间的方向正交性基本得到保障。但由于野外台站受安装条件、磁性环境等多方面因素的影响,不能保障所安装的地震计三分量一定准确位于正北、正东和垂直三个方向,即可能存在一定的方位偏差。而现代地震学研究强烈依赖于精确可靠的三分量宽频带地震观测记录,如 SKS 剪切波分裂研究、接收函数研究和面波研究等,都需要通过坐标旋转将两水平分量 BHN 和 BHE 质点运动分解为径向 R (水平入射方向)和横向 T (水平面内与入射方向垂直)。如果台站地震计的 BHN 方向与真北方向存在较大的方位偏差(相应 BHE 分量与真东方向也存在较大偏差),则方位角理论值旋转得到的结果也将存在较大的系统偏差,从而影响现代地震学研究结果的真实性和可靠性。因此,多年来国内外地震工作者十分重视台站地震计方位的准确性检验和校正等基础研究工作。如 Laske 等^[2]通过长周期面波偏振方法计算全球相速度变化时,发现全球分布的台站中有 37 个 Geoscope 台站的地震计方位不正确,偏差超过了 5° 。Larson 等^[3]在进行中长周期面波的偏振研究时也得到了类似的台站地震计方位偏差问题,并给出了全球地震台网 GSN 中台站地震计方位偏差大于 10° 的 10 个台站,与 Laske^[2]得出的地震计方位存在偏差的台站基本一致。Yoshizawa 等^[4]和 Schulte-Pelkum 等^[5]在对 GSN 地震台站进行 P 波偏振分析时,也发现了面波偏振分析方法提到的地震计方位偏差问题。Göran Ekström 等^[6]对美国 USarray 台阵一些固定地震台站进行了地震计方位的计算,结果表明有 7.4% 的台站地震计方位偏差大于 7° 。周琳等^[7]对鄂尔多斯地块周缘地区测震台站地震计方位角进行计算,显示中国数字地震台网某些台站确实存在方位偏差较大、极性反向等方面的问题。

我国于 2007 年底建设完成的“中国数字地震观测网络”项目,在中国大陆及周边地区建设完成了由 1 个国家骨干台网和 31 个区域台网组成的大规模测震台网,测震台站总数量达 1 000 多个,其中宽频带地震台站 850 多个。这些台站的建设为中国地震局地震监测预报体系的建设和地震科学基础研究提供了数据服务^[8-10]。

Niu 等^[1]利用基于 P 波质点偏振原理和多地震事件信噪比加权叠加方法,对中国大陆数字地震台站地震计的 BHN 向方位偏差等问题进行了计算研究。他们发现在已建成的“十五”数字地震台网中有近三分之一的台站存在 BHN 方位偏差较大或 BHN、BHE 极性反向等方面的问题,并给出了存在地震计方位偏差等问题台站的列表,引起了中国地震局和地震数据用户的高度重视。极性的问题主要是仪器出厂前存在的问题,需要返厂维修,这类问题很少。方位角的偏差究其原因在于架设测震仪器时采用罗盘确定方位,受房屋内磁性物质和各地不同的磁偏角的影响,指北方位精度很难保证。

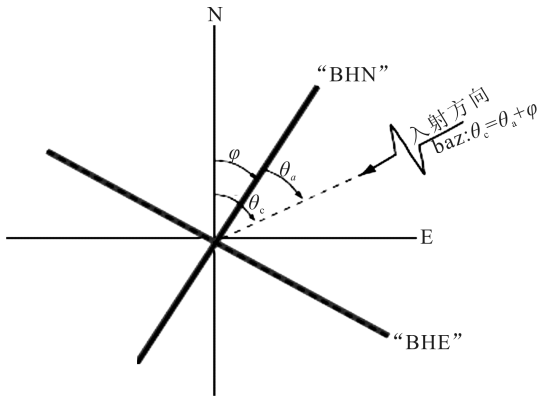
本文应用 P 波极性检测程序计算了甘肃测震台网 44 个子台自 2007 年以来地震计方位角的变化情况,分段给出了 44 个甘肃测震台站不同时期内地震计方位角的偏差值,确保了观测数据的可用性,方便了科研人员对甘肃测震数据的使用。

1 计算方法和数据选取

假设压缩 P 波通过水平成层各向同性介质传播到地震台站,则其粒子运动轨迹应该在包含震源与接收台站的平面内,同时假定各台站地震计的“BHN”和“BHE”分量严格水平并正交,因此 P 波在水平面内的投影集中在径向分量上,切向分量上没有能量。在图 1 所示的台站平面地理坐标系(N,E)中,如果台站地震计 BHN 方向与正北方向 N 重合(相应 BHE 方向与正东方向 E 重合),则由 BHN 方向到 P 波平面入射方向(偏振能量最大方向)的旋

转角度即为台站至地震的理论反方位角 θ_c 。

如果台站地震计的 BHN 方向与正北 N 方向存在一方位偏差 φ , 则 P 波偏振旋转角度 θ_a 变为 $\theta_a = \theta_c - \varphi$ 。因此从原理上来讲, 根据台站—地震理论反方位角 θ_c 和 BHN、BHE 分量确定的最大偏振能量旋转角 θ_a 即可确定台站地震计 BHN 方向方位偏差 φ ^[7]。



(图中, N、E 为台站处的真地理北和东方向, BHN 和 BHE 为地震计的视北和视东方向, θ_c 为根据台站、地震经纬度计算得到的台站—地震理论反方位角, θ_a 为利用 P 波质点偏振原理计算得到的偏振旋转角, φ 为台站 BHN 方向方位偏差, 以正北方向顺时针旋转为正)

图 1 地震计方位角关系原理示意图

Fig.1 A schematic plot showing the relationship between φ , θ_a and θ_c

Niu 等^[1]利用多事件信噪比加权叠加法 SNR 计算台站地震计 BHN 方位偏差 φ , 方法原理详见文献[1, 7]。其基本方法步骤为: 首先根据台站和地震经纬度, 计算理论反方位角 θ_c ; 然后对 φ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内按 1° 增量间隔进行全局扫描, 并对给定时间窗内的 BHN、BHE 分量 P 波振动, 按偏振旋转角

$\theta_a = \theta_c - \varphi$ 进行径向和横向振动分解, 并进行多地震事件的横向 P 波能量加权叠加(按信噪比加权); 最后取使横向 P 波能量加权叠加值最小的 φ 为台站地震计 BHN 分量的方位偏差。

本文利用 2007 年 8 月—2013 年 9 月的 549 个 $M_S \geq 6.0$ 、震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 、信噪比较好的远震事件进行研究。台站和震中分布见图 2。

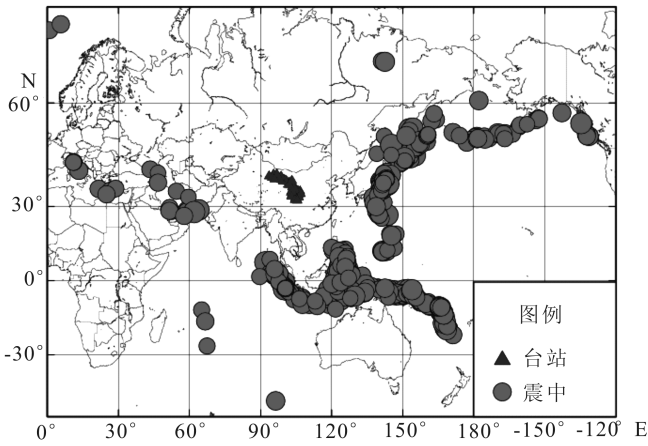


图 2 研究区域台站和本文计算所使用的 549 个远震事件的分布图

Fig.2 Distribution of stations in the study area and epicenters of 549 teleseismic events used in the study

2 计算结果和分析

利用 P 波质点偏振原理对甘肃测震台站地震计方位偏差进行对比计算分析, 延续 Niu 等工作, 通过增加地震事件, 计算甘肃测震台站地震计自安装使用以来方位角变化情况。以正北为 0° , 顺时针旋转时角度为正; 逆时针旋转时角度为负。表 1 列出了甘肃省测震台网地震计方位角偏差大于 5° 的

表 1 SNR 方法计算的甘肃测震台站地震计方位偏差表									
Table 1 Deviations of seismometer azimuth for Gansu Seismic Network Stations using SNR method									
台站代码	地震计型号	事件个数	时间段 1	偏差值 $\varphi / (^\circ)$ 及误差 $(^\circ)$	事件个数	时间段 2	偏差值 $\varphi / (^\circ)$ 及误差 $(^\circ)$	寻北仪检测结果	校正日期
BYT	BBVS-60	331	2008-04-2011-11	-8 ± 5	139	2011-12-2013-05	-36 ± 6	-33.9	2013-05-12
DBT	BBVS-60	477	2008-03-2013-05	8 ± 6	477	2008-03-2013-05	8 ± 6	2.3	2013-06-19
HCH	CMG-3ESPC	384	2008-06-2013-04	10 ± 4	384	2008-06-2013-04	10 ± 4	10.4	2013-04-26
HJT	CMG-3ESPC	228	2008-06-2011-05	-17 ± 8	159	2011-06-2011-11	-30 ± 8	-28.1	2013-05-23
HXT	BBVS-60	183	2008-02-2011-05	$E \rightarrow N -60 \pm 9$	143	2011-06-2013-04	-46 ± 4	-43.0	2013-04-25
JYG	BBVS-120	92	2007-08-2008-07	$E \rightleftharpoons N 9 \pm 4$	168	2008-08-2013-05	6 ± 5	3.7	2013-05-26
LTT	CMG-3ESPC	537	2008-03-2013-05	7 ± 5	537	2008-03-2013-05	7 ± 5	5.4	2013-06-17
LYT	BBVS-60	235	2008-07-2011-01	-9 ± 7	300	2008-04-2011-11	-5 ± 4	-4.9	2013-05-30
MIQ	BBVS-60	274	2009-08-2013-05	-36 ± 6	274	2009-08-2013-05	-36 ± 6	-36.6	2013-05-21
MXT	BBVS-60	510	2007-08-2013-05	6 ± 3	510	2007-08-2013-05	6 ± 3	6.5	2013-6-23
NXT	CMG-3ESPC	50	2008-06-2009-06	-26 ± 5	87	2011-10-2013-04	-29 ± 5	-31.0	2013-4-28
SNT	BBVS-60	549	2008-01-2013-04	12 ± 6	549	2008-01-2013-04	12 ± 6	3.2	2013-5-24
WDT	BBVS-60	49	2008-01-2008-07	-4 ± 3	507	2008-07-2013-06	-21 ± 4	-18.1	2013-6-22
ZHQ	CMG-3ESPC	193	2008-06-2010-08	28 ± 4	129	2011-11-2013-06	-15 ± 3	16.9	2013-6-18
ZHY	CMG-3ESPC	431	2008-03-2013-05	-9 ± 4	431	2008-03-2013-05	-9 ± 4	-5.82	2013-05-02

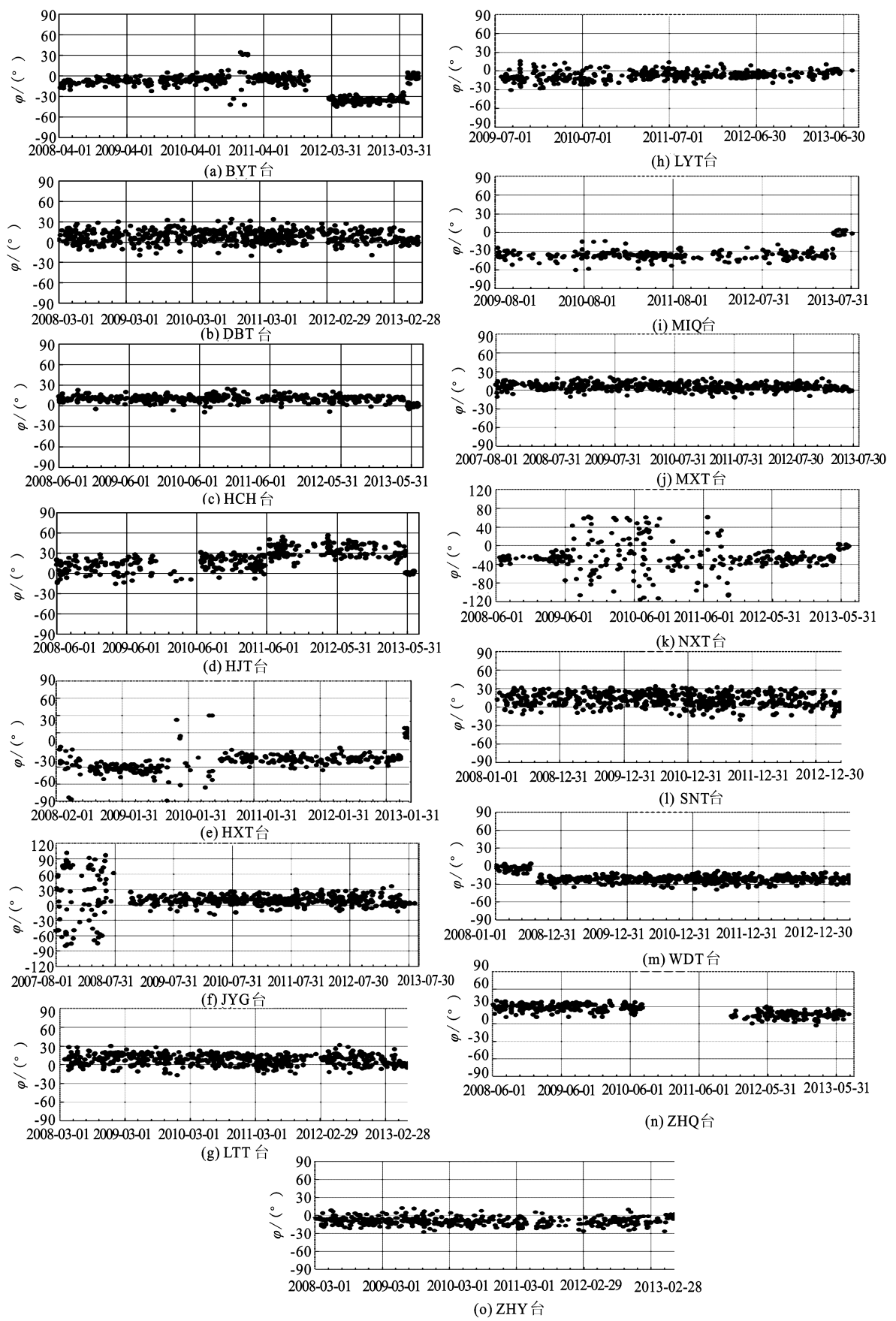


图 3 各台站地震计方位偏差计算结果时间序列图

Fig.3 Time-series of the deviations of seismometer azimuth for each station

台站及具体时间分段。图 3 描绘了地震计方位角偏差大于 5° 的台站地震计方位偏差反演结果时间序列图。

由于选取的地震事件个数较多、时间序列长度也相应地加长,本文的计算结果和文献[1]相比略有变化,其中地震计方位角偏差大于 5° 的台站有 15,占甘肃省测震台网的 34%。

3 甘肃测震台站方位角校正

2012 年 10 月中国地震局监测预报司为进一步提高测震台网数据质量,决定利用高精度寻北仪对各自辖区内的地震计方位角重新进行校正、制作永久方位标志,重新安装地震计。甘肃测震台网于 2013 年 6 月前利用 NV-NF301 型寻北仪完成了 44 个测震台站的仪器方位角校正工作,确保了 44 个台站的指北标志安装精度≤1。

校正结果显示:台站仪器架设方位角(φ)≥8°共有 9 个,占有所有台站的 20.4%; $2^{\circ}\leq\varphi\leq8^{\circ}$ 的共有 16 个,占有所有台站的 36.3%; $\varphi\leq2^{\circ}$ 的共有 17 个,占有所有台站的 38.6%。根据国家规范要求对 $\varphi\geq2^{\circ}$ 的台站进行了校正和重新安装,其中安西台准备异地重建设没有测量,玉门关台由于地处军事禁区,新址尚未堪选,剩余 42 个台站的原仪器方位角测定结果及校正情况见表 2。

从表 2 中可以看出:

(1) 本文得到的 44 个地震台站的地震计平均方位偏差结果跟 Niu 等的结果基本一致。Niu 等结果中地震计方位偏差绝对值<10°的台站(原文列表中未给出),本文的处理结果也大部分在 10°范围以内,只有 WDT(武都)台不一致,该台 2008 年 7 月调整仪器前方位角偏差小于 5°,后维修设备导致地震计摆放位置变化,2008 年 7 月至 2013 年 6 月方位角偏差达-21°,2013 年 6 月 22 日寻北仪检测结果偏差为-18.1°。

(2) Niu 等结果中地震计方位偏差较大的台站,本文的处理结果也显示这些台站的地震计确实存在较大的方位偏差,这和现场利用寻北仪检测出的偏差结果基本一致。

(3) NXT(宁县)台 2009 年 6 月至 2010 年 10 月间 BHE 分向地震计故障导致计算结果非常离散,维修后正常。其中 2008 年 6 月至 2009 年 6 月方位角偏差为-26°;2009 年 06 月至 2010 年 10 月由于仪器故障导致计算的方位角偏差值错误,2010 年 10 月 29 日维修后计算结果恢复正常;2010 年 10

月至 2013 年 4 月方位角偏差为-29°,2013 年 4 月 28 日寻北仪检测结果偏差为-31.1°,这个结果显示利用远震事件 P 波记录反演检核台站地震计方位偏差的可靠性和准确性。

(4) 对于 Niu 等文献中列出的 JYG 和 HXT 台地震计某分量极性接反以及 BHN、BHE 分量互换问题,

表 2 甘肃测震台站方位角测定及校正结果
Table 2 Check and Correction results of seismometer azimuth for Gansu Seismic Network Stations

台站代码	台名	地震计型号	产地	校正前方位角	偏差	永久标志安装精度
WDT	武都	BBVS-60	北京	341.86	-18.14	0.21
CXT	成县	BBVS-60	北京	357.71	-2.29	-0.03
TSS	天水	CTS-1E	湖北	356.55	-3.45	-0.10
MXT	岷县	BBVS-60	北京	6.50	6.50	0.00
HZT	合作	BBVS-60	北京	358.47	-1.53	0.05
PLT	平凉	BBVS-60	北京	1.73	1.73	0.03
JNT	静宁	CMG-3ESPC	英国	1.14	1.14	0.00
LZH	兰州	CTS-1E	湖北	359.70	-0.30	-0.07
JTA	景泰	BBVS-60	北京	0.21	0.21	0.02
SGT	石岗	BBVS-60	北京	358.07	-1.93	-0.08
HYS	红崖山	BBVS-60	北京	0.88	0.88	-0.59
HXP	河西堡	BBVS-60	北京	1.14	1.14	0.07
SDT	山丹	BBVS-60	北京	4.03	4.03	0.30
SNT	肃南	BBVS-60	北京	3.24	3.24	-0.09
WYT	渭源	BBVS-60	北京	357.84	-2.16	-0.07
WXT	文县	BBVS-60	北京	1.79	1.79	0.16
DBT	迭部	BBVS-60	北京	2.29	2.29	-0.02
YDT	永登	CMG-3ESPC	英国	358.80	-1.20	-0.10
BYT	白银	BBVS-60	北京	326.11	-33.89	0.44
LXA	临夏	BBVS-60	北京	61.04	61.04	-0.32
GTA	高台	JCZ-1	湖北	0.89	0.89	0.02
ZHY	张掖	CMG-3ESPC	英国	354.18	-5.82	0.13
WSH	武山	BBVS-60	北京	356.96	-3.04	-0.08
ZHC	张家川	CMG-3ESPC	英国	363.59	3.59	-0.24
HJT	桦尖	CMG-3ESPC	英国	28.13	28.13	-0.23
LTT	临潭	CMG-3ESPC	英国	5.40	5.40	-0.10
MQT	玛曲	CMG-3ESPC	英国	359.38	-0.62	-0.35
ZHQ	舟曲	CMG-3ESPC	英国	16.97	16.97	0.26
MIQ	民勤	BBVS-60	北京	323.41	-36.59	0.10
JYG	嘉峪关	BBVS-120	北京	2.70	2.70	-0.01
YJZ	俞井子	BBVS-60	北京	2.19	2.19	-0.03
QTS	青头山	BBVS-60	北京	0.79	0.79	0.03
JFS	金佛寺	BBVS-60	北京	359.24	-0.76	0.08
LYT	柳园	BBVS-60	北京	355.14	-4.86	-0.06
YWX	音凹峡	BBVS-60	北京	358.69	-1.31	-0.05
DHT	敦煌	BBVS-60	北京	354.71	-5.29	0.08
SBC	石包城	BBVS-60	北京	2.00	2.00	0.01
SGS	四个山	CMG-3ESPC	英国	1.66	1.66	0.71
HNT	会宁	CMG-3ESPC	英国	1.28	1.28	0.00
HXT	环县	BBVS-60	北京	316.96	-43.04	-0.19
HCH	华池	CMG-3ESPC	英国	10.39	10.39	-0.01
NXT	宁县	CMG-3ESPC	英国	329.02	-30.98	-0.01

计算结果显示 JYG 台在 2007 年 8 月—2008 年 7 月期间 BHN 和 BHE 分量互换。根据甘肃省测震台网值班日志记载 2008 年 7 月 JYG(嘉峪关)台原地震计 KS2000 更换为 BBVS-120,恢复正常;2010 年 5 月 HXT(环县)台原地震计 CMG-3ESPC

更换为 BBVS-60,方位角偏差为 -46° 。本文计算结果和现场仪器极性确认都证实甘肃测震台网 44 个测震台站均不存在极性接反和分量互换的问题。

4 结论

(1) 利用远震 P 波质点振动和台站—地震理论后方位角,可以有效检核台站地震计水平分量方位偏差及其可能的方位校正变化情况。

(2) 本文利用多个远震事件 P 波记录反演检核台站地震计方位偏差,计算了甘肃测震台站地震计自安装使用以来方位角的变化情况,特别是分段给出了台站地震计方位角的偏差值,一方面延续了 Niu 等在地震计方位角检测方面的工作,另一方面也系统地给出了台站地震计方位角的变化情况,确保了观测数据可用性。

(3) 无论 P 波极性检测程序计算结果还是寻北仪现场检测结果都表明中国数字地震台网个别台站确实存在方位偏差较大等方面的问题,通过现场对地震计方位角重新进行校正、制作永久方位标志,重新安装地震计等手段进一步提高了测震台网的数据质量。

(4) 应用 P 波极性检测程序计算了甘肃测震台网 44 个子台自 2007 年以来地震计方位角的变化情况,分段给出了不同时间段的方位角偏差,方便了科研人员对测震数据的使用。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”为本研究提供地震波形数据,感谢美国莱斯大学地球科学系钮凤林教授提供地震计方位角检测计算程序。

参考文献(References)

[1] NIU Feng-lin, JUAN Li. Component Azimuths of the CEArray Station Estimated from P-wave Particle Motion[J]. *Eatrhq Sci*, 2011, 24: 3-13.

[2] Laske G. Global Observation of Off-great-circle Propagation of Long-period Surface Waves[J]. *Geophys J Int*, 1995, 123: 245-259.

[3] Larson E W F. Measuring Refraction and Modeling Velocities of Surface Waves[D]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University, 2000.

[4] Yoshizawa K, Yomogida K, Tsuboi S. Resolving Power of Surface Wave Polarization Data for Higher-order Heterogeneities[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 133: 205-220.

[5] Schulte-Pelkum V, Masters G, Shearer P M. Upper Mantle Anisotropy from Long-period P Polarization[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 21917-21934.

[6] Göran Ekström, Robert W Busby. Measurements of Seismometer Orientation at Usarray Transportable Array and Backbone Stations[J]. *Seismological Research Letters*, 2008, 79(4): 554-561.

[7] 周琳, 王庆良, 崔笃信, 等. 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*, 2013, 35(2): 327-333. ZHOU Lin, WANG Qing-liang, CUI Du-xin, et al. Component Azimuths of Regional CEArray Stations Checked by Teleseismic P-wave Particle Motion[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(2): 327-333. (in Chinese)

[8] 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. *地震学报*, 2008, 30(5): 533-539. LIU Rui-feng, GAO Jing-chun, CHEN Yun-tai, et al. Construction and Development of Digital Seismograph Networks in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 30(5): 533-539. (in Chinese)

[9] Chen Q F, Chen Y, Li L. China Digital Seismic Network Improves Coverage and Quality[J]. *Eos Trans AGU*, 2006, 87(30): 294-299.

[10] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. 国家数字测震台网数据备份中心技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1412-1417. ZHENG Xiu-fen, OUYANG-biao, ZHANG Dong-ning, et al. Technical System Construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the Data Support to Researches on the Wenchuan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1412-1417. (in Chinese)