

倾斜仪在地震定位中的应用*

刘佳敏¹, 尹继尧¹, 任 焱¹, 尹欣欣²

(1. 上海市地震局, 上海 200062; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用上海综合深井观测系统中两分向倾斜仪记录的 25 Hz 采样观测数据, 与相邻台站地震仪对东海 $M_s7.0$ 中源地震进行地震定位结果对比分析。结果显示发震时刻最大误差仅 0.06 s, 震中位置最大误差 5.1 km, 并且定位结果都保持了较小的定位残差。因此高采样率深井倾斜仪记录的观测数据可以用于地震的定位分析。

关键词: 深井观测系统; 高采样率; 倾斜仪; 地震仪; 地震定位

中图分类号: P318.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)02-0219-05

0 引言

近年来, 随着城市工业化进程的加快, 为提高地震观测的抗干扰背景噪声能力, 地震观测技术呈现出由平面观测台网向大规模的立体监测网发展, 由单一方法向宽频带综合观测发展的趋势。开展深井地震综合观测, 一方面可以有效避开地表的人类活动对地震观测的干扰, 减少地表岩石风化、天气变化如降雨、雷电等的干扰, 获得质量相对较高的观测数据; 另一方面可以解决大、中型城市“地震监测盲区”问题。不同地震观测项目的传感器安装在同一个观测环境中, 可以对不同测项的观测资料进行对比分析, 能更客观地对地震观测资料中出现的异常信息进行深入分析, 辨别异常来源。

上海市综合深井观测两分向倾斜仪是国内首个使用高采样率监测的两分向倾斜仪。在实际运用上一方面可以选择相应的采样率, 获得月采样率或者天采样率应变数据来处理中长期或者短临前兆地震预报问题(卢双苓等, 2011), 并且在高采样率(25 Hz)的前提条件下, 可以获得更丰富的地球固体潮信息, 也有将倾斜监测仪用于岩土边坡工程监测, 倾斜仪适用于长期测量混凝土大坝、面板坝、土石坝等水工建筑物的倾斜变化量, 同样适用于工民用建筑、道路、桥梁、隧道、路基、土建基坑等的倾斜测量, 并可方便实现倾斜

测量的自动化(施志龙, 2011), 另一方面, 高采样率的倾斜仪记录的地震波与地震仪所记录到的地震波, 具有一定的相似性, 可以用来定位处理。

笔者以东海 $M_s7.0$ 中源地震应变地震波数据为例, 对应变地震波在地震定位中的运用进行了讨论分析, 提出了其相应的基本步骤和方法。

1 数据获取与分析

1.1 综合深井应变数据

上海市地震局在“十一五”中建设 2 个深井地震综合观测站, 分别位于浦东的张江和崇明的长江农场, 为后续深井综合地震观测站的建设提供经验和参考。每个站点深井中安装地磁仪、应变仪、倾斜仪、测震仪、孔隙压仪、地温仪、水温仪、水位仪, 地表安装强震仪和 GPS 总计 10 种测项, 同时地表还配备气压计和气温计等辅助观测手段。为目前为止配备地震观测测项最多的深井地震综合观测站, 且建成后连续长期运行。

崇明长江农场综合深井观测站位于上海市崇明县长江农场内(31.675°N, 121.544°E), 于 2011 年 4 月完成钻井和基建, 井深 463.6 m, 终孔孔径 151 mm, 最大井斜 0.7°, 2011 年 5 月安装深井综合观测仪器系统。两个台站的井斜都小于 1°, 远远大于常规井斜小于 3°要求, 既保证了综合仪器的正常安装, 又为获得高精度地震观测数据奠定坚实的基础。崇明长江农场站详细的地层分层

* 收稿日期: 2012-02-15.

基金项目: 上海市综合深井项目与地震科技星火计划项目(XH12017Y)资助.

结构如图 1 所示。考虑到井下地震计与地磁传感器之间的相互影响和干扰,同时方便一部分仪器的维修,深井综合仪器采取分体式安装,分别安装在井底和井壁,井底组采用膨胀水泥固结,使之能和周围基岩结为一体,得到高精度的地震观测数据,由于井底组无法正常维修,因此对井底组的观测仪器都进行备份。

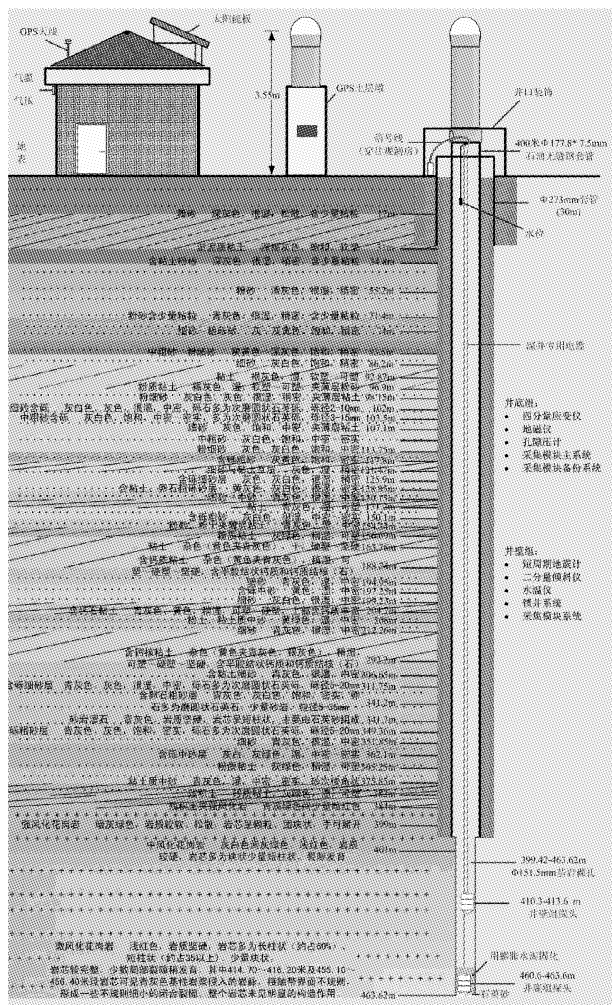


图 1 崇明长江农场深井地震综合观测站剖面示意图

Fig. 1 Section schematic diagram of comprehensive seismic observation in deep borehole on Changjiang Farm in Chongming

崇明长江农场综合深井中使用的两分向倾斜仪是珠海泰德公司生产的井下两分量倾斜仪 TBT-28, 原始采样率为 25 Hz。该倾斜仪采用传感器、采集器一体化模式, 使用内置电子罗盘, 并同过 TCP/IP 网络接口实现数据传输, 可在线存储 50SPS 数据一年以上。同中国地震局地震研究所胡

国庆研究员研制的 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪相比, 在低采样率的条件下对地震的映震能力较弱 (王强等, 2011), 从图 2b 上可以看到清晰的固体潮变化, 并在 11 点 00 分后出现明显的不同于固体潮变化的尖锐突起, 即倾斜仪地震波, 与应变地震波类似。与图 2a 高采样率 (25 Hz) 的倾斜仪记录相比, 明显比较简单, 基本上不能分辨出震相。

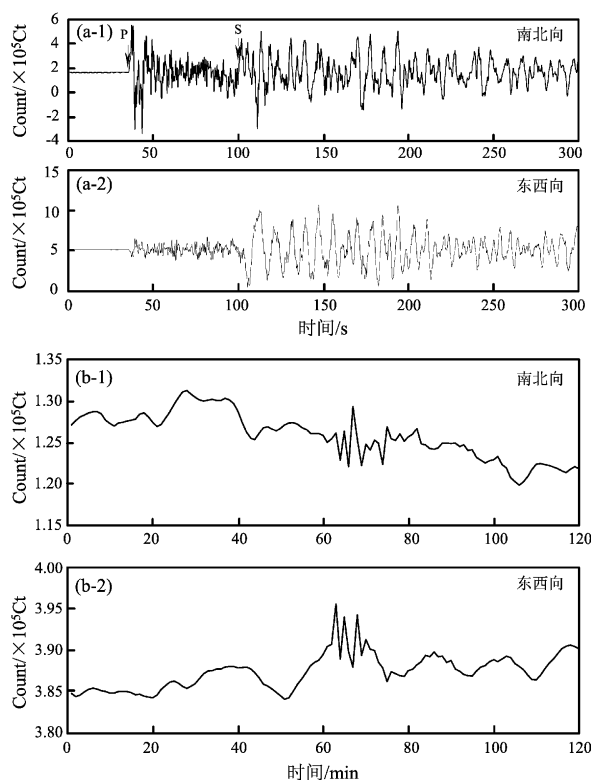


图 2 原始采样率数据 (数据时间: 2011 年 11 月 8 日 11 点 00 分至 05 分) (a)、分钟采样率数据 (数据时间: 2011 年 11 月 8 日 10 点 00 分至 12 点 00 分) (b)

Fig. 2 The recording of seismic wave in original sample rate (data time is from 11:00 am to 11:05 am on Nov. 8 in 2011) (a), in minute sample rate (data time is from 10:00 am to 12:00 am on Nov. 8 in 2011) (b)

1.2 相应地震仪数据

长江农场测震数据是崇明综合深井观测系统的一部分, 但使用的是短周期仪器, 因此本文选用距离最近的宽频带地震台南汇台 (NAH) (31.047 5°N, 121.755 6°E) 进行对比分析。由于震中距较远, 为了减少震相识别上的误差, 定位

分析参与台站全选用宽频带地震台, 包括余山 (SSE)、横湖 (HUH)、天平山 (TPS)、秦皇山 (QHS) 等, 具体部分台站波形数据见图 3 (数据长度均为 5 min)。

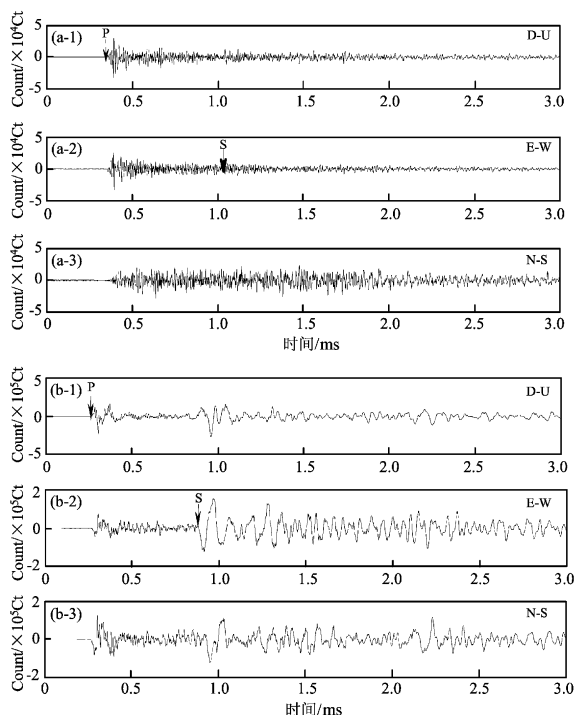


图 3 地震台站数据 (数据时间均为 2011 年 11 月 8 日 11 点 00 分至 05 分)

(a) 短周期台站 (长江农场) 数据; (b) 宽频带台站 (NAH) 数据

Fig. 3 The data recorded by seismic station (data time is from 11:00 am to 11:05 am on Nov. 8 in 2011)

(a) the short-period data recorded by Changjiang Farm Station; (b) the broadband data recorded by NAH Station

倾斜仪的地震记录以高频为主, 与短周期地震计记录很相似, 并且 P 波、S 波记录周期相差不大, 倾斜仪记录的 S 波震相远比短周期记录要清晰, 并且倾斜仪地震波的 P 波、S 波初动相对地震计记录均比较尖锐, 这对震相分析辨别有一定的帮助。

2 定位分析

2.1 定位介绍

两分向倾斜仪记录的地震波反映的是物体随

时间的倾斜变化及铅垂线随时间变化, 因此不能使用传统的单台定位方法定位 (这种单台定位需要地震波记录为三分量记录), 并且赵仲和与牟磊育 (2005) 的单台地震自动网格搜索法由于模型简单, 最终导致方位角偏差较大 (王强等, 2011), 因此将倾斜仪记录综合其他台站 (主要为宽频带台站) 数据进行综合定位。东海 $M_s 7.0$ 地震震中位于上海地震台网东南方, 震中距 620 km, 为中源地震。针对这种震中距的地震, 上海台网现使用的定位程序主要有“九五”泰德系统的波阵面法和修正波阵面法和“十五”JOPENS 系统 MSDP 软件的单纯型法、LOCSAT、HYPOSAT。修正波阵面主要是针对台湾地震特点所编制, 波阵面法则对于只能识别 P 波和 S 波的中深源地震无法得到比较准确的深度, 同样的单纯型法和 LOCSAT 也存在中深源地震深度误差较大的问题, 综合考虑本文使用广东省十五定位软件 MSDP 中的 HYPOSAT 定位 (赵仲和, 牟磊育, 2005)。该定位程序使用 AK135 模型 (陈贵美等, 2009), 能人工给定相应的初始化震源深度, 然后搜索定位 (反演和正演相结合), 给出相应的最优化结果。

为最大限度减少震相识别上的误差, 选用比较清晰的宽频带地震台站如余山、南汇、横湖、天平山、秦皇山台记录的数据, 使用能够定位的最少台站数, 这样能够保证每一个参与定位的台站的震相对最终定位结果的最大权重。在日常速报精定位工作中, 都是通过增加定位台站数目, 来提高定位精度, 主要也是减少震相不准确台站 (一般是由于钟差和震相失真问题所导致) 在最终定位结果的权重。

2.2 发震时刻与震中位置

表 1 为使用 5 个宽频带地震台站定位结果 (以下简称结果一), 4 个宽频带地震台 (5 个宽频带地震台站中任选 4 个) 加倾斜仪定位结果 (以下简称结果二), 5 个宽频带地震台加倾斜仪定位结果 (以下简称结果三) 的最终对比。

最终定位结果显示, 三者发震时刻相差不大, 最大时间差为 0.06 s。如保留一位小数的话, 三者完全相同, 均为 10:59:08.8。

结果一与结果二的震中纬度相差 0.041° , 经度相差 0.023° , 两者定位震中距离相隔 5.082 km, 结果二与结果三的震中位置较近, 震中距离 1.356 km。

表 1 定位结果对比

Tab. 1 Contrast of the location results

| 台站选取 | 发震时刻(统一北京时间) /时:分:秒 | $\varphi_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | 深度/km |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| 纯地震台定位结果 | 10:59:08.84 | 27.338 | 125.939 | 235 |
| 4 个地震台 + 倾斜仪定位结果 | 10:59:08.78 | 27.297 | 125.916 | 231 |
| 5 个地震台 + 倾斜仪定位结果 | 10:59:08.80 | 27.308 | 125.922 | 232 |

结果二和结果三的定位残差(残差就是通过最终定位结果正演该台站 P 波、S 波震相到时与实际台站 P 波、S 波实际到时的误差值),倾斜仪的残差分别为 0.27 和 0.36,与宽频带地震仪相差无几,说明在使用倾斜仪“地震波”震相参与定位时;与地震仪震相到时相匹配。在日常工作以及相关速报规定中,把发震时刻误差小于 5 s,震中误差小于震中距的 10%,台站最终残差小于 0.5 的数据,都认为数据可用性在系统误差范围内。上述均说明倾斜仪在该地震定位中效果良好,虽不如宽频带地震仪数据的实用性,但对于震中距稍远的地震,定位结果比短周期地震仪要好(S 波比短周期地震仪记录明显);另外定位深度方面,多种方法定位深度均在 230 km 左右(王强等,2011)。

相比国家台网中心最终定位结果(发震时刻 10:59:06.8,震中位置 27.2°N,125.9°E),震源深度 $h=220$ km),3 个定位结果均同国家台网中心最终定位结果存在一些误差,但总体误差均在规定范围内,误差是因为上海台网口径过小,并且地震偏在一隅导致的系统误差(表 2)。

表 2 对比残差表

Tab. 2 Contrast of residuals

| 台站 | SSE (余山) | NAH (南汇) | HUH (横湖) | TPS (天平山) | QHS (秦皇山) | 倾斜仪 |
|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------|
| 结果二残差 | 0.22 | 0.23 | — | 0.03 | 0.14 | 0.27 |
| 结果三残差 | 0.21 | 0.20 | 0.06 | 0.03 | 0.09 | 0.36 |

2.3 震级

由于倾斜仪是反映的测量物体随时间的倾斜变化及铅垂线随时间变化的仪器,其测量量是角度变化量,虽然倾斜仪的角度变化量也是震级的函数,但其内部的函数关系暂时没有相应的联系公式表达,所以暂时不能计算震级。地震仪数据则可以通过震

级公式 $M = \lg(A/T) + R(\Delta)$ 计算出。

3 讨论与结语

(1) 高采样率倾斜仪既可以作为前兆数据采集仪器获得相应的前兆信息,又可以作为“地震仪”参加地震定位。相比短周期地震仪地震波记录,高采样率倾斜仪地震波记录初动更加尖锐、清晰,并可容易分辨出 S 波。在采样率上,虽然倾斜仪的采样率已经提高到了 25 Hz,与高达 100 Hz、甚至 200 Hz 的地震仪相比还存在一定差距,在一定程度上影响震相的识别,但对地震定位结果影响不大。震级处理上,高采样率倾斜仪由于其仪器原理限制,不能从原始的震级定义中得到确定的震级。

(2) 最终定位结果比较显示,高采样率倾斜仪可以充当“地震仪”的角色,一方面,高采样率倾斜仪数据可以作为地震仪数据的“备份”,在地震仪器数据中断时,临时作为地震台站使用。另一方面,伴随综合深井的大规模建设,将布设更多的高采样率的倾斜仪,这等同于增加了一定数目的地震台站、增加了上海地区台站密度,间接提高了地震监测能力。

参考文献:

- 陈贵美,杨选,刘锦. 2009. 广东数字地震台网‘十五’系统的几种地震定位方法的定位效果分析[J]. 华南地震,29(1):69-78.
- 卢双苓,王强,林秀娜. 2011. 汶川地震前泰安台摆式倾斜仪异常现象分析[J]. 大地测量与地球动力学,31(B06):19-23.
- 施志龙. 2011. 地倾斜双轴垂直摆倾斜仪测量方法研究[J]. 地震地磁观测与研究,32(2):70-74.
- 王强,孟建国,吕春帅. 2011. VP 型宽频带倾斜仪映震能力分析[J]. 地震地磁观测与研究,32(4):94-98.
- 赵仲和,牟磊育. 2005. 单台地震自动定位网格搜索法及其 MATLAB 试验[J]. 地震地磁观测与研究,26(4):1-12.

Application of Tiltmeter in Earthquake Location

LIU Jia-min¹, YIN Ji-yao¹, REN Ye¹, YIN Xin-xin²

(1. *Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China*)

(2. *Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract

We compared earthquake location of the $M_s 7.0$ intermediate-focus earthquake in East China Sea obtained by the 25 Hz sampling observation data recorded by 2-component tiltmeter installed in comprehensive seismic observation system in deep borehole in Shanghai with the observation data recorded by seismometer of seismic stations in its adjacent area. The results show that the maximum error of the origin time and the epicenter location is only 0.06 s and 5.1 km respectively, and the residuals of earthquake location results is smaller in the earthquake location by using these two observation data, which shows that the observation data recorded by tiltmeter in high sample rate in deep borehole can be used as the earthquake location analyze.

Key words: observation system in deep borehole; high sample rate; tiltmeter; seismograph; earthquake location