doi: 10.11720/wtyht.2026.1276
陈玺,伍忠良,王祥春,等. OBS 高精度二次定位技术在南海神狐海域的应用[J]. 物探与化探,2026,50(1):162-168. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1276
Chen X, Wu Z L, Wang X C, et al. Application of high-precision OBS repositioning in the Shenhu area, South China Sea[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 162-168. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1276

OBS 高精度二次定位技术在南海神狐海域的应用

陈玺[1,2],伍忠良[1,2],王祥春[3],王明[1,2],李福元[1,2],王猛[3],李建平[1,2],林江南[1,2]
(1. 广州海洋地质调查局,广东 广州 511458;2. 天然气水合物勘查开发国家工程研究中心,广东 广州 511458;3. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院,北京 100083)

摘 要: 海底地震仪(OBS)广泛应用于海洋地球物理勘探,在地壳内部结构研究、海底滑坡监测、资源勘探等多个领域发挥着不可替代的作用。OBS 在海面投放后,受多个因素的影响,实际落点位置与投放点通常会有较大的偏离,这种偏差会严重降低后续成像或反演的精度,因此,针对 OBS 进行二次定位是数据处理的关键环节。本文梳理了 OBS 二次定位的主要方法,并对神狐海域实际采集的 OBS 数据进行了二次定位。本次 OBS 资料在采集前对采集板电路进行了改造,开展了时钟漂移纠偏,实现了整个采集系统相对时间戳一致;在此基础上应用时间切片法完成了二次定位,得到的二次定位结果均能满足实际科研需求,且反演得到的等效水速和深度结果与拖缆地震深度域成像结果更为接近。

关键词:海底地震仪;海洋地球物理;二次定位;直达波走时;时钟漂移;神狐海域
中图分类号: P31;P631.4;P67 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0162-07

0 引言

在海洋地球物理勘探中,海底地震仪(OBS)通过在海底记录主动源或被动源的地震波信号,为揭示海底构造、资源分布及地震活动性提供关键数据。然而,受海流作用、潮汐涌动及复杂海底地形影响,OBS 以自由落体方式沉放后,其实际坐底位置常显著偏离预设坐标,研究显示,其实际位置与投放位置在深水环境中偏移量可达 50~500 m(平均 206 m),导致后续成像、震相拾取和速度建模等工作产生系统性偏差[1-16]。因此,OBS 二次定位(重定位)是数据处理流程中不可或缺的环节,其精度直接影响勘探成果的可靠性。

二次定位的核心是利用地震波传播特性与几何关系反演 OBS 真实位置。早期方法依赖人工拾取直达波初至时间,计算效率低且主观误差显著[1-5]。近年来,随着算法优化与设备升级,涌现出多种高精度、自动化方法。本文系统梳理了主流二次定位技术的原理,量化评估其精度与适用条件,并对神狐海域实际采集的 OBS 进行了精细的二次定位,为后续与拖缆联合成像和速度建模工作提供了准确的信息,满足了实际生产需要。

1 OBS 二次定位方法

1.1 方法分类

1)基于直达波走时的传统反演法。该方法利用直达水波走时与震源点坐标建立方程组求解 OBS 位置,是最基础且广泛使用的技术。其原理是:假设海水速度恒定,OBS 与震源点间的直线距离满足 $d=vt$,其中 v 为海水声速,t 为直达波走时。通过多个震源点构建超定方程组,采用最小二乘法求解 OBS 坐标[1-5,8-9]。根据震源点几何分布,该方法衍

收稿日期: 2025-08-07; **修回日期**: 2025-10-30
基金项目: 广东省海洋经济发展专项(GDNRC[2023]40);中国地质调查局项目(DD20201118,DD20240090);国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFF0509900)
第一作者: 陈玺(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋地球物理资料及海域天然气水合物调查研究工作。Email:cxfox_2000@163.com
通讯作者: 伍忠良(1967-),男,正高级工程师,主要从事海洋物探调查研究工作。Email:52936891@qq.com

生出网格节点法[6-7]和十字交叉法[6]两种优化变体。网格节点法将目标海域划分为密集网格,计算各节点理论走时并与实测走时比对,拟合误差最小点即为 OBS 位置。十字交叉法通过模拟不同漂移情景下的直达波线性动校正(LMO)曲线,建立漂移方向判据,利用正交测线数据反演位置。传统反演法容易受放炮延迟、时钟漂移和走时拾取误差等的影响,且在直线排列震源点精度有限。

2)基于到时差的高效反演法。因时钟误差对所有震源点走时产生等量偏移,而到时差不受其影响。许龙庆[10]采用相邻震源点直达波到时差代替绝对走时,克服了传统方法对手动拾取和时钟误差的敏感性,结合蒙特卡罗方法与最小二乘法联合反演,大大提高了校正效率,避免了主观误差的产生,并表现出不错的校正精度。

3)结合测深数据的射线追踪法。针对海水速度空间变化引起的误差,Liu 和 Oshida 等[11-12]提出融合高精度测深数据与射线追踪的三步定位法。该方法根据相同偏航距离下时间—距离曲线的对称性,计算 OBS 在测线上的投影点,以沿垂直测线方向在测深剖面中查找与观测时间最匹配的深度节点为初始位置,搜索确定最终的位置。该方法尤其适用于地形起伏显著的海域,但其精度依赖于测深数据分辨率与速度模型准确性。

4)基于时间切片的几何拟合法。为消除海水速度的影响,王祥春、李华等[13-14]利用等走时震源点位于同一圆上的几何特性(圆心为 OBS 水平投影点),通过多次切片拟合提高了定位精度,并实现了深度与速度联合反演。

5)设备集成声学定位技术。除地震波反演方法外,声学二次定位通过 OBS 集成水声应答器实现直接测距[15-16]。将换能器内置于防护壳体内,通过声波传输时间结合船载 GPS 坐标计算位置,实现实时高精度定位,直接输出坐标,避免了复杂的反演过程。

1.2　方法精度对比与局限分析

影响 OBS 二次定位的核心因素包括震源点排列方式、时钟漂移、走时拾取误差、海水速度变化、海底地形起伏等,几种定位方法都有各自的优势和局限(表 1),在生产和科研中,应对实际需求、研究尺度等进行综合考虑,有针对性地开展定位处理。

表 1　主要 OBS 二次定位方法精度及优缺点对比

Table 1　Positioning accuracy and comparative analysis of primary OBS repositioning methodologies

方法	定位精度/m	计算效率	主要优势	主要局限
直达波走时反演法	50~100	中	原理简单,适用广	受时钟漂移、拾取误差影响显著
直达波到时差法	20~40	高	抗时钟漂移,自动化程度高	依赖震源点密度
射线追踪+测深数据	50~500	中低	适应复杂地形与速度结构	测深数据质量要求高
时间切片法	水平 30,深度<10	中高	无需预设速度,精度高	需多切片,计算量较大
声学定位(设备集成)	1~5	实时	精度极高,独立于地震采集	成本高,需专用声学设备

2　神狐海域 OBS 资料二次定位

2.1　OBS 资料的采集

2024 年,广州海洋地质调查局在南海北部神狐海域开展了 OBS 与二维多道地震的联合勘探,调查区水深 800~2 000 m,海底地形地貌比较复杂。为了尽可能地准确定位 OBS 落点,共布设了近 NS 向测线 6 条,近 EW 向测线 4 条,OBS 站位间距 200 m,炮间距 25 m,如图 1 所示。

2.2　时间漂移校正

数据分析对时钟要求较高,在采集中如果多台设备的相对时间戳误差过大,将严重影响后续的数据处理工作。虽然在采集开始前,会对采集内部时钟进行授时,但随着时间增长和工作温度的变化,内部计时偏差会越来越大。因此项目组在采集前对 OBS 采集电路板进行了改装,完成改装后进行了时钟漂移纠偏工作。

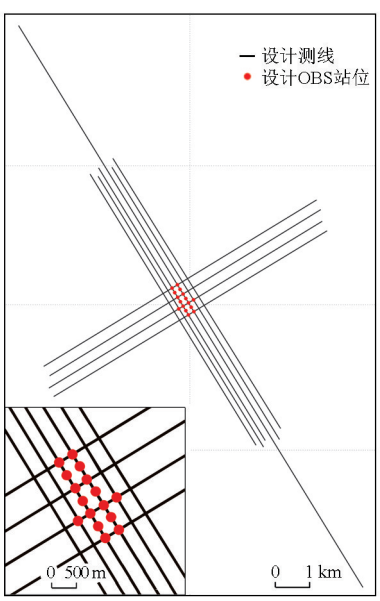


图 1　南海神狐海域 OBS 设计与采集测线示意

Fig. 1　OBS deployment and seismic survey lines map in the Shenhu area of the South China Sea

首先,内部时钟选用精度可达到 10^{-8} 的高精密晶振,外部授时采用北斗/GPS 高精度授时系统,并在 OBS 内部设计加装附加温度补偿电路使周围温度保持稳定,从而使得整个采集板电路保持极低的时间漂移。其次,将采集板放置在冰箱内,调整冰箱温度开展测试,确定时钟漂移曲线同时检验温度补偿电路的效果。冰箱初始温度设置为 25 ℃,将采集板初始温度稳定在 25 ℃附近时开始通电进行测试;采集板在一次对时后输出测试信号,模拟进行炮点计数及计时;随后再将冰箱温度设置为 5 ℃,模拟 OBS 在海水的环境,定时保存温度记录。测试周期为预计的投放—回收周期。测试完成后,将温度数据及炮点数据取出分别进行统计并进行二次对时,得出时钟漂移曲线(图 2)。经统计,累计时针漂移最小 3 030 μs,最大 6 920 μs。利用每台 OBS 的钟漂曲线即可解析到准确的地震数据。

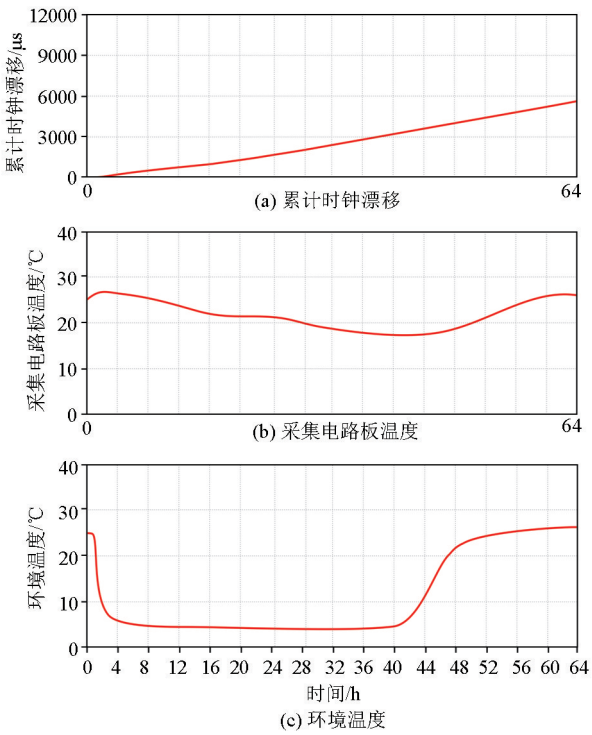


图 2 模拟 OBS 布放过程中的温度变化及时钟漂移曲线

Fig. 2 Curves of temperature variation and clock-drift error in the simulation of OBS deployment process

在实际数据采集完成后,导入每台设备时钟漂移曲线,对原始数据进行时钟拟合,实现了多台设备的相对时间戳误差在一个极低的范围内。

2.3 OBS 二次定位

在精确拾取直达波基础上,以 1 500 m/s 为初始海水速度,采集时测得投放点水深为初始深度值,采用时间切片法开展二次定位。第一次用 5 m 的精度开展拟合,得到初步结果后,以新的海水速度和水深值开展第二次 0.1 m 的高精度拟合。

为了提高计算效率,在计算过程中只选取小于 1 000 m 偏移距的数据(图 3)。相比原始数据线性动校正结果(图 3a),第一轮校正后已实现大部分测线线性动校正后直达波拉平,但在 Line-02 线和 Line-L3 线上还存在一定的起伏;第二轮校正后,完全实现了线性动校正后直达波拉平(图 3b、c 中箭头所示)。为方便质控,设置线性动校正基线为 0.1 s。

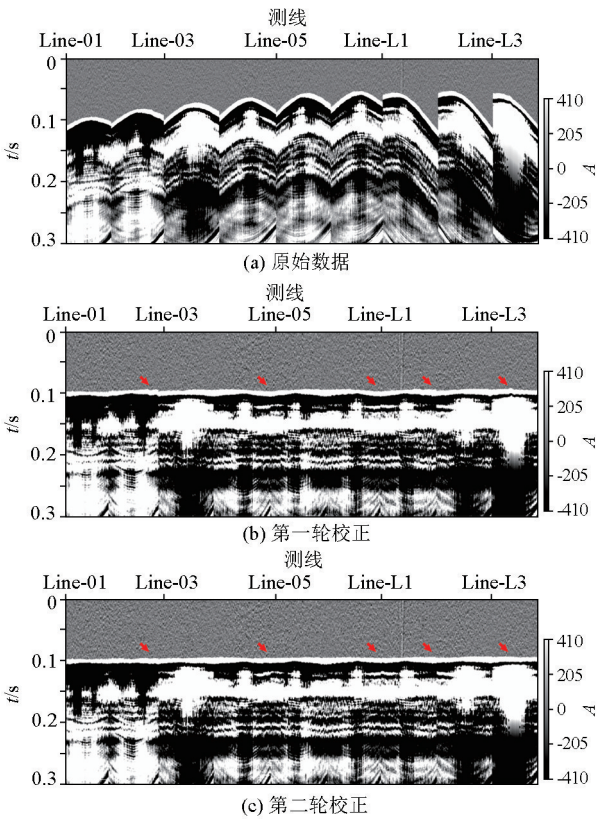


图 3 原始数据及两轮二次定位后的直达波线性动校正效果

Fig. 3 Performance of linear moveout correction on direct waves of raw data and direct waves after dual-stage repositioning

2.4 反演结果分析

二次定位前后 OBS 位置叠合显示如图 4 所示,由于海流及海底地形的影响,实际位置与投放位置均存在一定的偏差,落点位置均往西南漂移,与该海域海流的流向高度相关。图 5 为位置漂移量的具体统计,最小漂移量约 60 m,最大漂移量约 110 m,平均漂移量在 90 m 左右。

在二次定位反演的同时得到了等效水速和深度,为了验证其准确性,将速度和深度与该区域以往的拖缆三维叠前深度偏移结果进行了对比。为了进行准确对比,在三维地震体上截取了经过 OBS 实际落点的任意线,如图 6 所示,将 OBS 深度投影在深度域剖面上,结果表明差异均较小。表 2 统计了 OBS

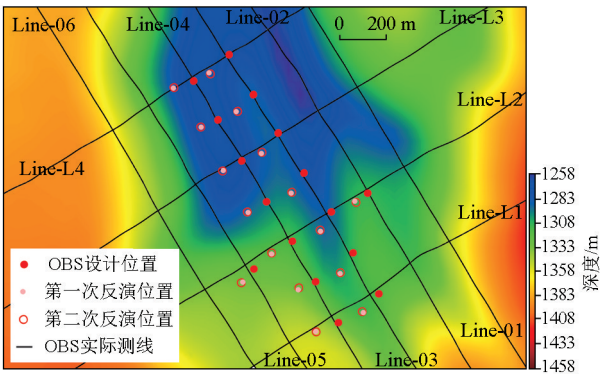


图 4　OBS 二次定位反演结果

Fig. 4　Results of OBS repositioning

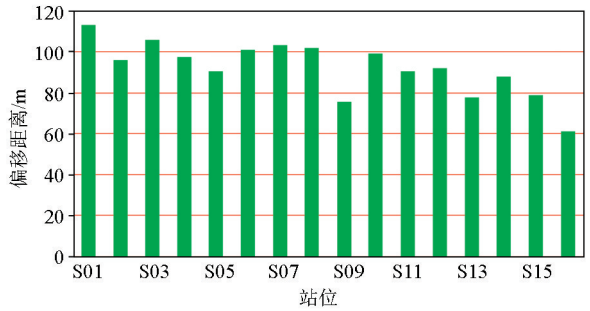


图 5　二次定位后 OBS 实际位置与投放位置的偏移量

Fig. 5　Position deviation between relocated and deployment locations

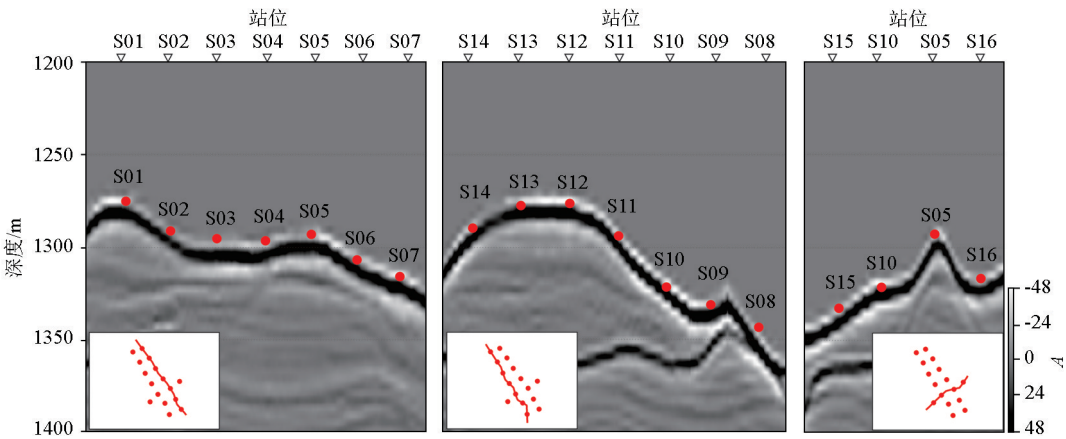


图 6　反演得到的 OBS 沉放深度与拖缆地震数据深度剖面对比

Fig. 6　Deployment depth inversion vs. towed-streamer depth profiles

表 2　OBS 各站位反演深度与拖缆三维叠前深度偏移海底深度以及等效海水速度统计

Table 2　A statistical comparison between inverted depths at OBS stations and the seabed depths derived from towed-streamer depth profiles

站位	海底深度/m			反演海水速度/(m·s^{-1})
	反演深度	剖面深度	差值	
S01	1275.17	1275.26	0.09	1483.2
S02	1291.27	1292.81	1.54	1482.7
S03	1295.35	1298.97	3.62	1481.9
S04	1296.69	1299.16	2.47	1483.1
S05	1293.01	1292.02	−0.99	1482.4
S06	1306.99	1305.98	−1.01	1484.7
S07	1315.83	1315.09	−0.74	1486.3
S08	1343.50	1347.31	3.81	1483.3
S09	1330.93	1328.88	−2.05	1485.9
S10	1321.58	1319.30	−2.28	1492.1
S11	1293.93	1294.93	1.00	1485.9
S12	1276.41	1275.02	−1.39	1486.5
S13	1277.59	1275.13	−2.46	1484.2
S14	1289.68	1287.60	−2.08	1483.9
S15	1332.74	1334.90	2.16	1485.6
S16	1316.63	1317.59	0.96	1486.5

反演得到的深度值及拖缆三维叠前深度偏移剖面上拾取的海底值及其差值,统计结果表明反演精度较高,差异均小于 5 m,只有 S03、S04、S08、S09、S10、S13、S14、S15 八个站位的差值大于 2 m。

表 2 还给出了反演得到的等效海水速度,图 7 为对应的拖缆地震深度域速度剖面。在深度域速度剖面上,海水层的速度为 1 480 ~ 1 490 m/s,表明 OBS 反演得到的等效海水速度是较为准确的,只有 S10 站位有些偏差。

同样是受海流、潮汐及海底地形等多个因素的影响,OBS 在海底的姿态(方向)是随机的,导致其记录的水平分量的参考方向也是随机的。在处理中,完成二次定位后,需要对 OBS 进行方向校正,即确定 OBS 在海底的真实水平方位角,以便将不同的地震信息还原到相应的分量上。将记录在水平分量(XY)上的信息,旋转还原到沿测线的径向(Radial)和垂直测线的切向(Transverse)两个方向上,称为 R-T 旋转。R-T 旋转可以消除因检波器姿态引起的纵横波记录串扰现象,提升转换波信息的处理效果[3,17-19]。R-T 旋转本身依赖于准确的方位角,方位角是通过炮点的坐标和 OBS 的坐标计算得到的,如果二次定位不准导致方向校正错误,那么即使进行了 R-T 旋转,得到的 R 和 T 分量也是不准确的,

会使本该主要在 R 分量上出现的 P 波能量发生泄漏到 T 分量;因此,可以利用旋转结果检验二次定位的效果。

以 S13 和 S14 两个站位为例(图 8,图 9),为了方便对比和质控,选择偏移距小于 1 000 m 的数据,并对数据进行了线性动校正(线性动校正基线

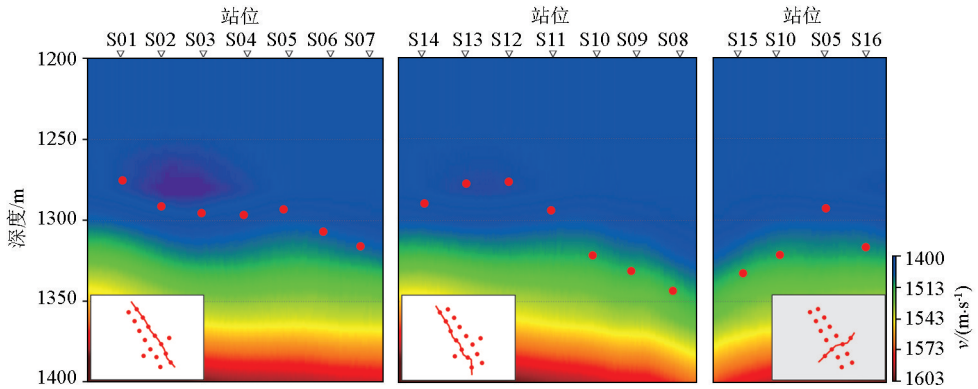
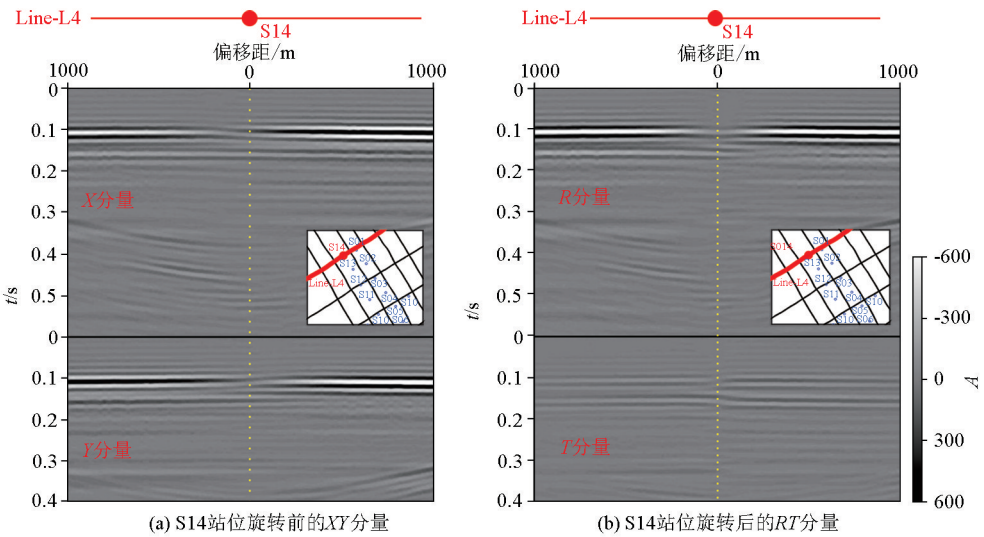


图 7　深度域速度剖面

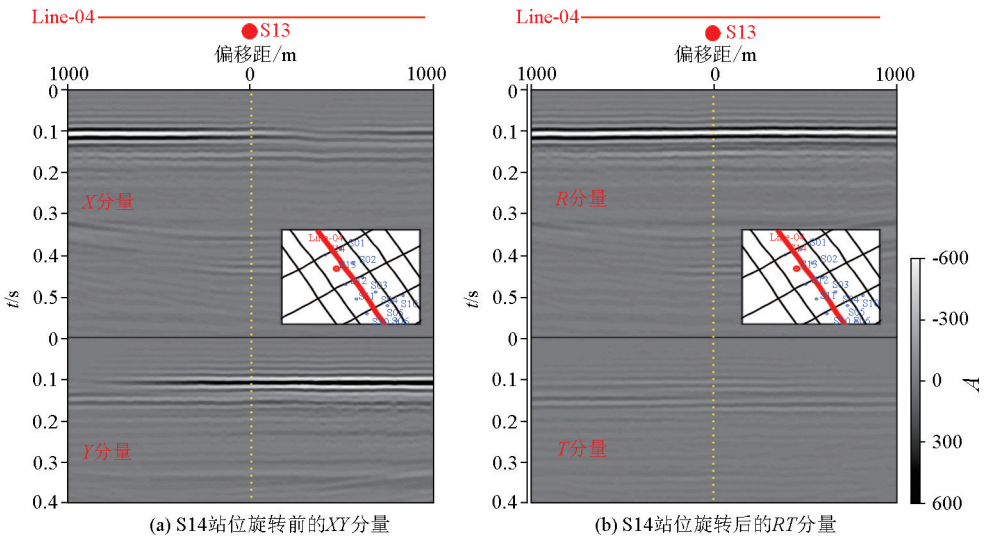
Fig. 7　Depth-domain velocity profile



(a) S14站位旋转前的XY分量　　(b) S14站位旋转后的RT分量

图 8　OBS 落点在测线正下方时 R-T 旋转前后对比

Fig. 8　R-T Rotation analysis for OBS landing directly below survey line



(a) S14站位旋转前的XY分量　　(b) S14站位旋转后的RT分量

图 9　OBS 落点不在测线正下方时 R-T 旋转前后对比

Fig. 9　R-T Rotation analysis for landing non-directly below survey line

0.1 s)。当 OBS 真实位置正好位于测线正下方时(图 8),旋转后 *R* 分量直达波极性一致,且在近偏移距能量弱;*T* 分量只残留很弱的转换横波能量且极性相反,几乎没有直达波能量;未发现有泄漏的 P 波能量。当 OBS 真实位置不在测线正下方时(图 9),*R* 分量接收的能量强度没有随偏移距的变化出现很大的不同,*T* 分量同样只很弱地转换横波能量,但极性相同。R-T 旋转结果显示用于方向校正的方位角是正确的,这从另一个角度证明了二次定位结果的准确性。

3　结论及讨论

校正 OBS 实际落点位置是后续进行数据处理的基础。有准确的位置信息才能计算得到准确的反射点或转换点,因此它是影响处理效果的关键参数之一。影响二次定位准确性的因素有很多,包括炮点分布方式、时钟漂移、直达波拾取精度等。本次神狐海域 OBS 数据在采集时即考虑了时钟漂移和炮点分布的问题。一是通过对电路板的改造和时钟漂移纠偏工作,实现了多台设备的相对时间戳误差的一致,从而从根源上解决了钟漂问题;相比设备集成声学定位技术,该方法不需要专用声学设备,具有成本低、易于实现的优势。二是采用了“六纵四横”的炮点排列方式,为精确定位提供了更多的信息。在此基础上,应用时间切片法通过两轮拟合,实现了 OBS 水平位置、OBS 沉放深度、等效海水速度等 4 个维度的高精度反演。

但也存在个别站位误差可能偏大的现象,如 S10 站位的反演海水速度相比深度域速度偏大。在 S03、S04、S08、S09、S10、S13、S14、S15 这八个站位,站位深度与拖缆深度剖面有明显差异,这些差异可能是拖缆深度剖面归位不够准确或 OBS 直达波拾取有误差导致,需要进行更深入的分析和研究。

参考文献(References):

[1] 王彦林,阎贫,郑红波,等. OBS 记录的时间和定位误差校正[J]. 热带海洋学报,2007,26(5):40-46.
Wang Y L,Yan P,Zheng H B,et al. Timing and positioning corrections of ocean bottom seismograph data[J]. Journal of Tropical Oceanography,2007,26(5):40-46.

[2] 敖威,赵明辉,丘学林,等. 西南印度洋中脊三维地震探测中炮点与海底地震仪的位置校正[J]. 地球物理学报,2010,53(12):2982-2991.
Ao W,Zhao M H,Qiu X L,et al. The correction of shot and OBS position in the 3D seismic experiment of the SW Indian Ocean Ridge[J]. Chinese Journal of Geophysics,2010,53(12):2982-2991.

[3] 夏常亮. OBS 地震数据关键处理环节研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009.
Xia C L. A study on pivotal data processing procedure of ocean bottom seismograph[D]. Beijing:China University of Geosciences,2009.

[4] 夏少红,敖威,赵明辉,等. 海洋广角地震数据校正方法探讨[J]. 海洋通报,2011,30(5):487-491.
Xia S H,Ao W,Zhao M H,et al. Corrections and analysis of wide angle seismic data from the sea[J]. Marine Science Bulletin,2011,30(5):487-491.

[5] 刘斌. 海底地震仪重新定位:以东沙群岛海域为例[J]. 热带海洋学报,2015,34(2):66-70.
Liu B. Ocean bottom seismometer relocation:Using Dongsha sea area as an example[J]. Journal of Tropical Oceanography,2015,34(2):66-70.

[6] 李丽青,陈玺,伍宗良,等. 深水环境下 OBS 的二次定位技术[J]. 海洋地质前沿,2013,29(11):54-61.
Li L Q,Chen X,Wu Z L,et al. Technique for relocating obs in deep water environment[J]. Marine Geology Frontiers,2013,29(11):54-61.

[7] 黄龙泽. 基于波动方程的炮检点二次定位方法[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
Huang L Z. The secondary positioning of shot point and receiver based on wave equation[D]. Qingdao:Ocean University of China,2009.

[8] 徐云霞,文鹏飞,张宝金,等. OBS 在琼东南海域水合物矿体识别中的应用[J]. 物探与化探,2020,44(6):1276-1282.
Xu Y X,Wen P F,Zhang B J,et al. The application of OBS to the identification of hydrate in Qiongdongnan(southern Hainan)sea area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(6):1276-1282.

[9] 徐云霞,文鹏飞,张宝金,等. 琼东南海域 OBS 纵波资料成像处理关键技术[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(5):185-192.
Xu Y X,Wen P F,Zhang B J,et al. The key technique of OBS P-wave imaging processing in Qiongdongnan area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2018,38(5):185-192.

[10] 许龙庆. 基于直达水波到时差的主动源 OBS 重定位方法[C]//厦门:2024 中国地球科学联合学术年会,2024:510.
Xu Q L. Active-source OBS relocation method using direct water-wave travel-time Differences[C]//Xiamen:2024 Annual Meeting Of Chinese Geoscience Union ,2024:510.

[11] Liu H W,Liu H S,Xing L,et al. A new method for OBS relocation using direct water-wave arrival times from a shooting line and accurate bathymetric data[J]. Marine Geophysical Research,2022,43(2):20.

[12] Oshida A,Kubota R,Nishiyama E,et al. A new method for determining OBS positions for crustal structure studies,using airgun shots and precise bathymetric data[J]. Exploration Geophysics,2008,39(1):15-25.

[13] 王祥春. 一种基于时间切片法的海底地震仪重定位方法:CN106443776B[P]. 2019-01-25.

Wang X C. Relocating ocean bottom seismometers using the time-slice method:CN201610397744[P]. 2019-01-25.

[14] 李华,刘佳仪. 一种确定海底地震仪位置与等效海水速度的多维扫描法[J]. 石油物探,2024,63(1):61-68.
Li H,Liu J Y. A multi-dimensional scanning method of locating ocean bottom seismometer and determining equivalent seawater velocity[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2024,63(1):61-68.

[15] 韩立强,常稳. 海底电缆初至波二次定位技术的应用[J]. 石油物探,2003,42(4):501-504,512.
Han L Q,Chang W. Application of first break second positioning technique in OBC[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2003,42(4):501-504,512.

[16] Morvan P Y,Pelletier H,Blomme R. Positioning for ocean bottom systems (OBS) applications:A case study[C]//Rio de Janeiro:2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics),2015:1-4.

[17] 乌云巴特尔,杨丽莹,齐鹏,等. 海底地震仪(OBS)水平分量 R-T 旋转方法研究[C]// 海口:2022 年中国石油物探学术年会论文集(下册),2022:1559-1562.
Wuyunbateer,Yang L Y,Qi P,et al. Research on the R-T rotation method for horizontal components of OBS[C]//Haikou:Proceedings of the 2022 China Petroleum Geophysics Annual Conference,2022:1559-1562.

[18] 张文波,张少华,孙鹏远,等. OBN 数据三分量重定向分析与质控[J]. 石油地球物理勘探,2023,58(3):610-616.
Zhang W B,Zhang S H,Sun P Y,et al. Three-component reorientation analysis and quality control for OBN data[J]. Oil Geophysical Prospecting,2023,58(3):610-616.

[19] 闫凯鑫,王芷琪,李庆春. 利用折射波的海底节点地震三分量检波器重定向方法[J]. 石油地球物理勘探,2023,58(2):305-314,324.
Yan K X,Wang Z Q,Li Q C. Three-component geophone reorientation method based on refracted waves for ocean bottom nodes seismic survey[J]. Oil Geophysical Prospecting,2023,58(2):305-314,324.

Application of high-precision OBS repositioning in the Shenhu area, South China Sea

CHEN Xi[1,2], WU Zhong-Liang[1,2], WANG Xiang-Chun[3], WANG Ming[1,2], LI Fu-Yuan[1,2], WANG Meng[3], LI Jian-Ping[1,2], LIN Jiang-Nan[1,2]

(1. *Guangzhou Marine Geological Survey*, *Guangzhou* 511458, *China*; 2. *National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development*, *Guangzhou* 511458, *China*; 3. *School of Geophysics and Information Technology*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The ocean-bottom seismometers (OBS), a tool extensively utilized in marine geophysical exploration, hold indispensable significance for studies on the Earth's crustal structure, submarine landslide monitoring, and resource exploration. Upon OBS deployment on the ocean's surface, its final landing position typically deviates significantly from the predetermined position due to the influence of various factors. This positional deviation will severely undermine the accuracy of subsequent seismic imaging or inversion. Consequently, the OBS repositioning is necessary during data processing. This study reviewed the primary methods for OBS repositioning and applied them to the OBS data acquired in the Shenhu area, the South China Sea. Prior to data acquisition, the circuit of the data acquisition board was modified, including clock skew correction, achieving timestamp synchronization across the entire acquisition system. Building upon these enhancements, repositioning was successfully performed using the time-slice method. The repositioning results consistently satisfy the rigorous research requirements, while inverted equivalent water velocity and depth parameters demonstrate closer alignment with depth-domain imaging results derived from towed-streamer seismic surveys.

Key words: ocean-bottom seismometer (OBS); marine geophysics; repositioning; direct-wave traveltime; clock skew; Shenhu area

(本文编辑:叶佩,沈效群)