

邢子浩, 义家吉, 杨德鹏, 等. 基于同步单波束测深数据的单道地震涌浪静校正方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 181-188.
XING Zihao, YI Jiaji, YANG Depeng, et al. Single-channel seismic swell static correction method based on synchronous single-beam echo sounder data[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 181-188.

基于同步单波束测深数据的单道地震涌浪静校正方法

邢子浩¹, 义家吉¹, 杨德鹏², 鲁旭¹, 李伟¹, 许丞¹, 蔡砥柱¹, 陈靛¹

1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127
2. 国家海洋局北海海洋技术保障中心, 青岛 266033

摘要:涌浪问题在单道地震中普遍存在, 它使地震同相轴发生抖动, 导致剖面错乱、模糊, 从而干扰或误导地质解释。由于现有的涌浪校正方法都有一定的适用条件, 该问题仍然没有被解决。本文基于单波束测深数据提出了一种新的涌浪静校正方法, 首先阐述了该方法的基本原理和实现步骤, 然后通过野外实际资料验证了该方法的有效性并与滤波方法进行了对比和分析, 最后讨论了单道地震中另外一种“似涌浪干扰”的海底抖动现象, 并展示了新方法在该问题上的应用效果。研究表明, 本文提出的方法能够有效解决单道地震中涌浪造成的同相轴时移问题, 特别对于复杂海底资料中的涌浪干扰处理效果良好。
关键词:单道地震; 涌浪干扰; 单波束测深数据; 静校正

中图分类号: P714 文献标识码: A DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2022091203](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022091203)

Single-channel seismic swell static correction method based on synchronous single-beam echo sounder data

XING Zihao¹, YI Jiaji¹, YANG Depeng², LU Xu¹, LI Wei¹, XU Cheng¹, CAI Dizhu¹, CHEN Liang¹

1. Haikou Center of Marine Geological Survey, China Geological Survey, Haikou 571127, China
2. North China Sea Marine Technical Support Center, State Ocean Administration, Qingdao 266033, China

Abstract: The swell problem is prevalent in single-channel seismic, which causes jitter in the seismic events and leads to misaligned and blurred profiles, and thus interferes or misleads geological interpretation. The problem is still not well solved because all existing swell correction methods have certain conditions of applicability. Therefore, we proposed a new method of the swell static correction based on single-beam echo sounder data. First, the basic principle of the method and the implementation steps were introduced, and then the effectiveness of the method was verified against the field data and the result were compared and analyzed with the filtering method. Finally, another type of "swell-like interference" in single-channel seismic seafloor jitter phenomenon and the application effect of the new method on the problem were discussed. Results show that the new method we proposed could effectively solve the time shift problem caused by swell in single-channel seismology, especially for the swell interference in complex seabed data; and the processing effect was good.

Key words: single-channel seismology; swell interference; single-beam echo sounder; static correction

高分辨率单道地震是一种用来探测海底浅部地层结构和构造的地球物理方法, 它具有配置灵活、简单方便、高效经济、准确直观、分辨率高等优点, 近年来已广泛应用于海洋区域地质调查、海岸带综合地质调查、海域地质灾害研究、天然气水合物资源勘查及近海工程等领域, 随着相关采集设备、处理技术的发展, 单道地震应用前景也会愈加广阔^[1-2]。然而, 在单道地震施工过程中风浪或涌浪

是普遍存在的, 漂浮在海面附近的震源和接收缆很容易受到它们的冲击而上下起伏、左右摇摆, 从而导致原始数据中的反射波同相轴发生抖动现象, 这些抖动的存在使得剖面的信噪比和分辨率降低, 剖面质量变差, 有时达到几乎难以解释的程度。因此, 在单道地震数据处理中压制涌浪带来的干扰是一项重要工作。

目前, 针对涌浪校正国内外学者已经提出了一

资助项目:中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心地质调查专项(ZD20220606, ZD20220610); 中国地质调查局潮汕海岸带综合地质调查项目(DD20200813)

作者简介: 邢子浩(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事海上地震数据采集、处理及相关研究, E-mail: starzhou@163.com

通讯作者: 陈靛(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事海洋地质研究, E-mail: clcugb@163.com

收稿日期:2022-09-12; **改回日期:**2022-11-01. 周立君编辑

些可行的技术和方法。一类是基于数据自身特征的涌浪校正方法,主要有模型道互相关技术、中值滤波、均值滤波、高斯平滑滤波、局部时窗最优化等方法,其中,李丽青等^[3]提出了利用模型道互相关统计法计算涌浪对每道造成的时移量,然后通过静校正来消除地震剖面上同相轴抖动现象;罗进华等^[4]提出利用中值滤波和均值滤波对拾取的海底反射界面进行滤波,将滤波前后的反射时间差值作为校正量,以此消除涌浪的影响;丁维凤等^[5]综合模型道互相关、中值滤波和均值滤波等方法对单道地震和浅地层剖面数据进行了涌浪改正处理;付小波等^[6]提出了高斯平滑与模型道互相关相结合的涌浪静校正方法,首先利用高斯滤波对海底初至曲线进行平滑处理,然后再利用模型道互相关技术计算剩余校正的时移量,从而完成时移校正;张彬彬等^[7]提出了局部时窗最优化校正方法用于压制剩余涌浪影响。另一类是借助外部约束信息的涌浪校正方法, Kim 等^[8]、郝高建等^[9]采用多波束地形数据校正浅地层剖面仪探测的海底,从而消除了涌浪影响。基于数据自身特征的涌浪校正方法一般适用于海底起伏不大、地形平缓的数据,由于大部分水下地形均可以满足这个条件,因此该方法在涌浪校正中得到了广泛应用,例如刘伍^[10]利用平滑滤波校正了上海近岸海域高分辨率单道地震的同相轴起伏;王圣民等^[11]采用均值滤波压制了舟山海域高分辨率单道地震中的涌浪干扰;徐岩等^[12]利用 RadExpro 软件的涌浪校正模块(alpha 均值滤波)消除了三亚近海的浅剖资料反射同相轴抖动现象;刘玉萍等^[13]采用模型道互相关技术压制了南海低信噪比单道地震资料中的海底抖动。但当海底地形复杂崎岖时,该类方法的涌浪校正效果往往欠佳,其结果是要么压制不足,涌浪干扰仍然存在;要么过分平滑,导致海底地层真实反射形态遭受破坏。针对这一问题,结合其他资料信息加以约束实现涌浪校正无疑是一种良好的解题思路,例如利用多波束测得的高精度地形数据来校准地震剖面中的海底位置,这样一方面能压制涌浪干扰,另一方面能将真实的海底地形反映到地震剖面中^[9]。然而,遗憾的是多波束数据在近岸浅水地区的获取成本较高,难以实现全覆盖,导致该方法的推广受阻。

与多波束测深相比,单波束测深数据更易获得,一般情况下,在采集浅地层剖面、单道地震和多道地震数据过程中都会同步进行单波束水深测量。目前,单波束水深测量多采用基于 GNSS 技术的综合水下测深系统,该系统主要由 GPS RTK、测

深仪、罗经、姿态传感器和导航软件组成^[14]。其中,姿态传感器可以测量船体受涌浪影响发生的横摇、纵摇和上下起伏变化等信息,从而消除姿态因素对单波束测深的影响^[15]。水深数据再经过吃水改正、声速改正、时延改正及滤波等处理后,能够获得准确可信的海底地形。基于这一技术背景,本文提出了一种利用同步单波束测深数据约束来实现单道地震涌浪校正的方法,通过实际资料分析讨论了该方法的有效性。

1 处理方法

首先,将单道地震剖面每一道对应的单波束水深数据 D 通过公式(1)转换成采用一定施工参数的海底双程旅行时间 T_D ;然后,用该时间与拾取的海底初至时间 T_B 相减,获得海底受涌浪影响产生的时移量 ΔT ;最后,以计算出的时移量为校正量,对每一道做静校正处理即可准确消除涌浪带来的时移影响。

$$T_D = \frac{\sqrt{X^2 + (2D - H_S - H_R)^2}}{V} \quad (1)$$

$$\Delta T = T_D - T_B \quad (2)$$

式中, H_S 、 H_R 分别是震源和接收电缆的沉放深度, X 是震源中心到电缆中心的距离, V 是根据声速剖面计算的水中平均声速。

该方法具体处理步骤如下:

(1) 拾取海底: 从地震剖面上获取每一道的坐标和海底初至时间 T_S ;

(2) 位置校正: 将单道地震道头记录的坐标校正到真实的反射点位置;

(3) 水深匹配: 根据位置最近原则, 为每一道匹配水深数据;

(4) 深时转换: 将每一道对应的水深数据转换成时间数据;

(5) 道集时移: 计算时移量并进行静校正。

1.1 拾取海底

可采用能量比法进行海底初至时间的自动拾取, 如图 1 所示。其算法如下:

(1) 设置一个开始搜索的时刻(其位置应在海底反射波之上, 直达波之下)和时窗长度, 这样海底初至波就被限制在由上述两个参数确定的搜索窗口中(图 1 绿色方框);

(2) 在搜索窗口内, 计算每个采样点前后两个目标窗口(图 1 橙色方框)中的平均能量, 并求取第

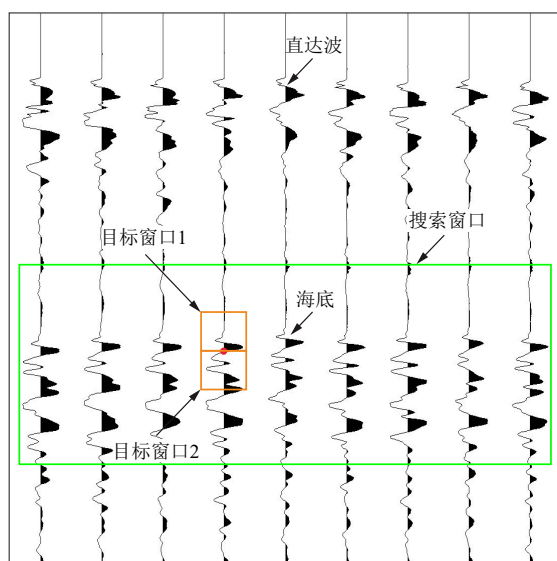


图 1 能量比法自动拾取海底示意图

Fig.1 Diagram of the energy ratio method of auto pick-up from the seabed

二个窗口能量与第一个窗口能量的比值, 记为该样点处的能量比;

(3) 对比搜索窗口内所有采样点处的能量比, 最大能量比值对应的时间即为海底初至时间;

(4) 最后输出每一道的野外文件号 (FFID)、坐标和海底初至时间。

此外, 当资料信噪比较低或直达波距离海底非常近时, 自动拾取效果往往较差, 此时需要手动去修正。

1.2 位置校正

由于位置校正运算不能在球面坐标上进行, 只能在平面坐标中计算, 因此在位置校正前需要将 SEGY 数据中记录的大地坐标转换为投影平面坐标。然后, 根据反射点与 SEGY 记录位置的相对关系 (图 2) 及航向进行线性平移即可得到真实的反射点平面坐标值。计算公式为:

$$E_R = E_O + S_R \cdot \sin(h + \alpha) \quad (3)$$

$$N_R = N_O + S_R \cdot \cos(h + \alpha) \quad (4)$$

式中, E_R 、 N_R 为校正后反射点的平面坐标, E_O 、 N_O 为 SEGY 所记录的大地坐标经投影变换计算出来的平面坐标, S_R 为反射点与 SEGY 坐标记录位置间的距离, h 为船艏向, α 为反射点与 SEGY 坐标记录位置的连线与船中轴线的夹角。

对于船艏向信息的获取, 若导航数据中记录了船艏向, 可通过 SEGY 数据中记录的炮点时间与导航数据中记录的船艏向时间进行匹配来提取每一

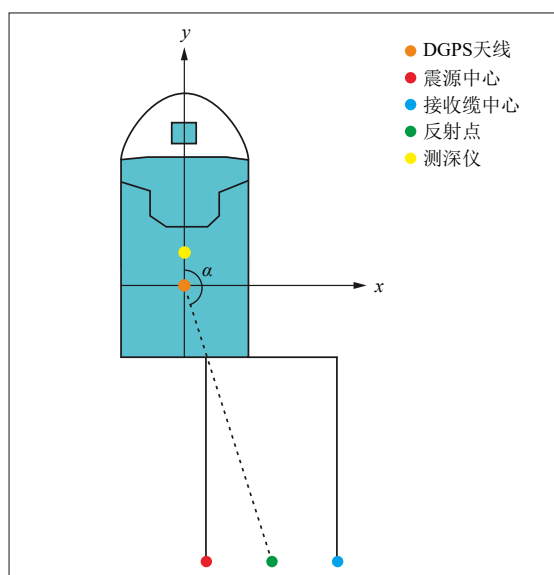


图 2 单道地震中反射点记录位置与实际位置间的关系

Fig.2 Relationship between the recorded and actual positions of reflection points in single-channel seismology

道对应的船艏向; 若导航数据中没有记录船艏向, 则只能利用 SEGY 记录位置来推算船航迹向, 用航迹向代替船艏向进行反射点位置的推算^[16]。

1.3 水深匹配

在每一道附近, 计算反射点与测深点之间的距离, 将距离最小的并且经过室内修正后的水深值作为该道对应的水深。

1.4 深时转换

根据公式 (1), 将每一道对应的水深数据转换成实际施工条件下的海底双程旅行时间, 再根据公式 (2) 计算出涌浪造成的时移量 ΔT ;

1.5 道集时移

将计算出的时移量 ΔT 写入地震道头中, 并以其作为校正量对每一道做静校正处理, 即可消除涌浪造成的时移影响, 获得具有真实海底的单道地震剖面数据。

2 应用实例

2.1 平缓起伏的海底

图 3 为本文提出的方法在实际资料处理中的应用, 该资料取自粤东沿海, 调查区海底地形相对平坦, 主要的采集参数如表 1 所示。图 3a 是原始地震剖面, 很显然该剖面在采集过程中受到了高频风浪

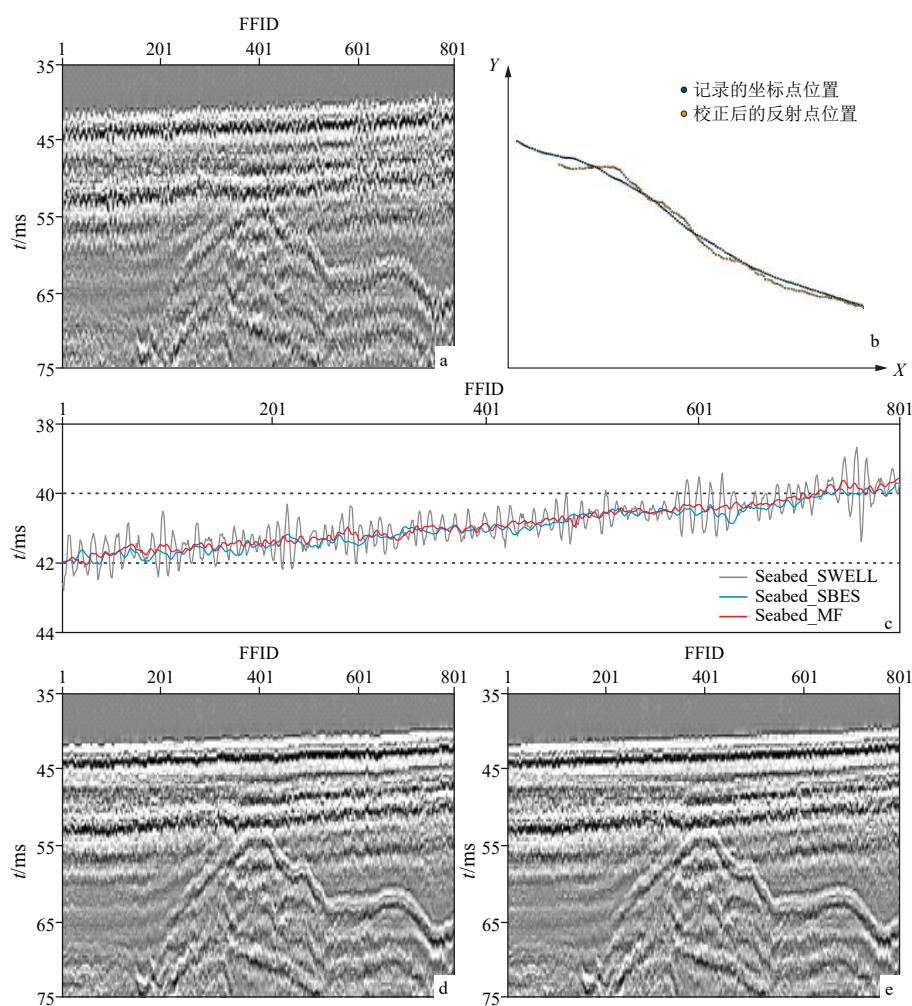


图3 平坦海底的单道地震资料处理效果对比分析

a: 原始剖面, b: 反射点校正前后的位置图, c: 校正前后的海底初至曲线, d: 使用单波束测深数据校正后的剖面, e: 使用均值滤波校正后的剖面。

Fig.3 Comparison in processing result of single-channel seismic data on flat sea bed

a: original profile, b: position diagram before and after reflection point correction, c: the firstbreak curves of seabed before and after correction, d: profile after correction using single-beam echo sounder data, e: profile after correction using mean filtering.

的影响,其特征是海底反射轴呈现锯齿状抖动,海底以下同相轴也以同样的时移量发生错动,从而造成地层错乱、模糊,极大地干扰了后续解释工作。

按照上述给出的处理步骤,首先,需要拾取海底的反射初至,如图3c中灰色曲线(Seabed_SWELL)所示;然后,进行反射点位置校正,由于本次导航数据中并未记录船艏向,因此使用了航迹向代替船艏向进行反射点位置的推算,其结果在平面坐标系中的投影见图3b;接着,使用真实的反射点坐标与水深数据进行位置匹配,并将匹配好的水深数据转换至时间域,结果见图3c中蓝色曲线(Seabed_SBES);最后,计算出时移量,并以其作为静校正量完成海底校正,结果如图3d所示。

对比图3a和图3d可以看出,处理后的剖面同

相轴变得清晰、连续,地层分辨率得到大大改善,层位信息也更加丰富。图3e是采用11点均值滤波(mean filtering, MF)消除涌浪干扰后的剖面,与图3d对比发现,两种方法的处理效果基本相当。理论上,采用单波束水深数据约束校正的结果更加接近于真实海底,而平滑滤波处理得到的则是海底的变化趋势,当海底起伏平缓时两者差别不大。因此,在缺少测深数据或者追求处理效率的情况下,使用滤波方法进行涌浪压制也是可行的。

2.2 复杂崎岖的海底

图4a展示了一段海底为沙波的单道地震剖面,该资料取自海南岛近岸海域,主要的采集参数如表1所示。海底沙波是一种韵律形的海床地貌形态,其

表 1 粤东沿海及海南岛近岸海域单道地震采集参数

Table 1 Single-channel seismic acquisition parameters in the offshore of eastern Guangdong and along the coast of Hainan Island

采集参数	参数值	
	粤东沿海	海南岛近岸
震源类型	电火花/2000J	电火花/500J
炮检距 (X) /m	6.6	8
DGPS至反射点的距离 (S_R) /m	46.52	49.2
反射点和DGPS连线与船中轴线的夹角 (α) /(°)	181.5	184.7
震源沉放深度/m	0.5	0.5
接收缆沉放深度/m	0.5	0.5
平均声速/(m/s)	1 508	1 520

“脊尖槽缓”的排列特征往往与涌浪的“锯齿状抖动”具有一定的相似性,因此当使用滤波方法压制涌浪干扰时首先需要排除海底为沙波的可能性。然而,当两者叠加在一起时,资料就会变得异常复杂,正如图 4a 所呈现的那样,海底的错乱已经达到无法辨认的程度,连基本走势的识别都相当困难。

图 4b 和图 4c 分别是使用本文方法和均值滤波方法消除涌浪干扰后的剖面,在没有图 4b 对比的情况下,常规滤波方法处理后的剖面可以认为颇为理想,海底同相轴清晰连续,易于追踪,沙波地貌也可以识别出来。然而,若使用该数据对沙波开展进一步研究,有可能会将结果引向误区,这是因为平滑滤波已经改变了沙波的原始形态。相关研究表明,沙波的形态特征不仅是它分类的依据,而且能够指示其沉积环境、移动方向、活动性以及流体特征^[17-18]。仔细对比两图中绿色方框的部分可以看出,真实的海底沙波具有不对称的形态,这种不对称性可以指示其运移方向,一般认为沙波的运移方向是从沙波的缓坡指向陡坡,因此通过图 4b 能够清楚地判定出沙波由北向南迁移,同时也表明该区域水动力条件较强,沙波处于活动时期。如若使用图 4c 对沙波进行解释则是另外一种结果,沙波脊部圆滑且呈对称形态,指示底流在此处达到平衡,沙波迁移可能停止或方向发生改变。

由此可见,在海底地形崎岖复杂的情况下,均值滤波压制涌浪干扰的同时也会抹掉海底和地层的细节变化,使其形态发生改变,从而带来不可预知的结果,有些时候这些被忽略的细节特征对工程施工设计很重要;而基于单波束测深数据的海底校正方法不仅能压制涌浪干扰,还能将真实的海底地形反映到地震剖面中,处理结果更加准确可靠,可以作为科学研究、工程建设的基本依据。

3 讨论

在单道地震资料中有时会存在另外一种海底抖动现象,如图 5a 所示。通常人们会将这种情况归因于低频涌浪,但通过观察剖面中海底同相轴的起伏形态显然不符合涌浪干扰的特征,原因有二:①涌浪的波动往往是持续且有规律的,而剖面中的海底抖动无论在分布位置还是在幅度大小上都显得很随机,当然这也不是海底地形本身的变化,图 5c 是同步采集的单波束水深数据,可看出该段地形是非常平坦的;②剖面中同一道上海底反射波与直达波具有相似的起伏变形,海底上凸直达波也上凸,海底下凹直达波也下凹,这种特征并不是涌浪所能造成的。综合上述原因,图 5a 剖面中的海底抖动与涌浪无关。

图 5b 是采集图 5a 剖面时调查船的航迹线,两图对照来看,在航向发生急转的位置直达波以及海底同相轴均相应出现下凹或上凸的形变,说明剖面中这种海底抖动现象是与船舶急转弯有关的。借助图 6 对这种现象的原因做进一步分析,如图 6a 所示,震源和接收缆拖曳于调查船之后,当调查船沿测线方向稳定行驶时,缆源间距保持不变,采集的资料可以正确反映海底地形;当调查船向左急转弯时,见图 6b,由于接收缆的长度大于震源缆的长度,因此震源达到拉直状态的速度要比接收缆快,在这一过程中震源首先远离接收缆中心,然后随着接收缆被拉直,缆源间距回归正常,反映在地震剖面上直达波、海底以及海底以下地层同相轴会向下弯曲变形;当调查船向右急转弯时,见图 6c,在震源和接收缆被拉直的过程中,缆源间距先变小再回归正常,反映在地震剖面上直达波、海底以及海底以下

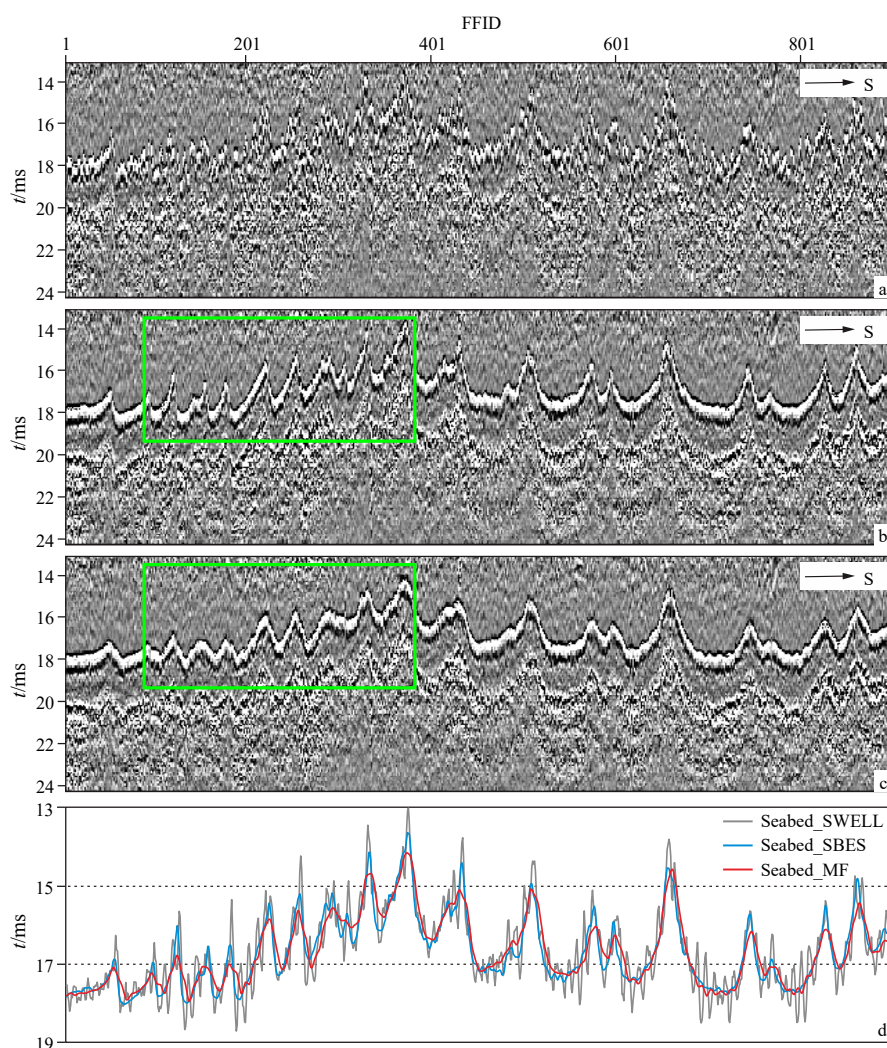


图4 复杂海底的单道地震资料处理效果对比分析

a: 原始剖面, b: 使用单波束测深数据校正后的剖面, c: 使用均值滤波校正后的剖面, d: 校正前后的海底初至曲线。

Fig.4 Comparison in processing result of single-channel seismic data on complex seabed

a: original profile, b: profile after correction using single-beam echo sounder data, c: profile after correction using mean filtering, d: the firstbreak curves of seabed before and after correction.

地层同相轴会向上弯曲变形。若在一段测线上,调查船反复急转方向,海底就会出现连续上下起伏,形成地形假象,正如图 5a 展示的那样。

这种由调查船急转弯产生的“假海底”是否可以消除呢? 图 5d 是采用图 5c 所示的单波束测深数据校正后的剖面,可以看出虽然海底的真实形态可以恢复,但是海底以下地层同相轴却校正过量(图中绿色箭头所示),导致剖面再一次被改造,原因在于地震波传播速度随地层深度的加深而逐渐增大,相应的缆源间距变化造成的同相轴形变量将随之减小,也就是说在同一道上消除这种影响所需的校正量是随时间逐渐变小的,该问题并非静校正可以解决的。因此,建议在单道地震施工过程中船舶驾驶人员要尽量保障船舶匀速、恒向行进,在遇到障

碍物时要提前缓慢变向绕行,避免因船舶急转弯对数据资料造成影响。

4 结论与建议

(1) 本文提出的方法不仅可以消除涌浪干扰,还可以将真实的海底地形反映到地震剖面中,处理结果更加准确可靠。

(2) 当海底比较平坦时,滤波方法和本文方法的涌浪压制效果差别不大,平常处理此类资料时可以优先考虑滤波方法;但当海底地形复杂时,滤波方法是不可取的,建议选用本文方法或者其他类似方法。

(3) 除涌浪外,调查船急转弯是造成海底抖动

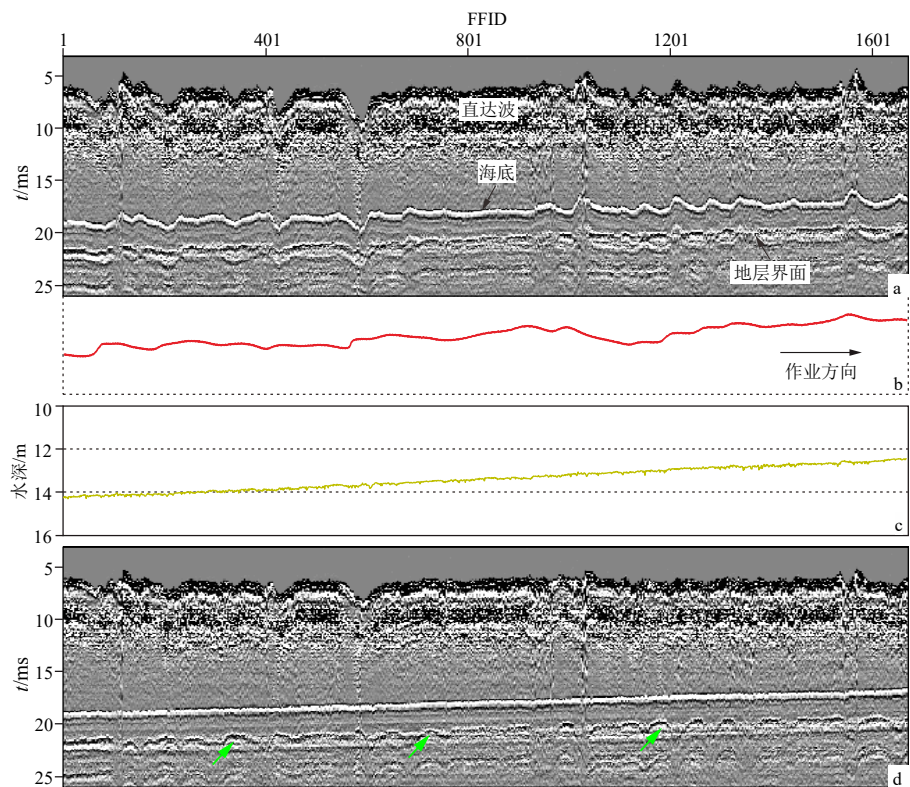


图 5 船舶急转弯对剖面的改造及处理效果分析

a: 受船舶急转弯影响的原始剖面, b: 航迹线, c: 水深线, d: 使用单波束测深数据校正后的剖面。

Fig.5 Analysis on the results of modification of profile at sharp turn of the ship

a: original profile affected by the sharp turn of a ship, b: track line, c: water depth line, d: profile after correction using single-beam echo sounder data.

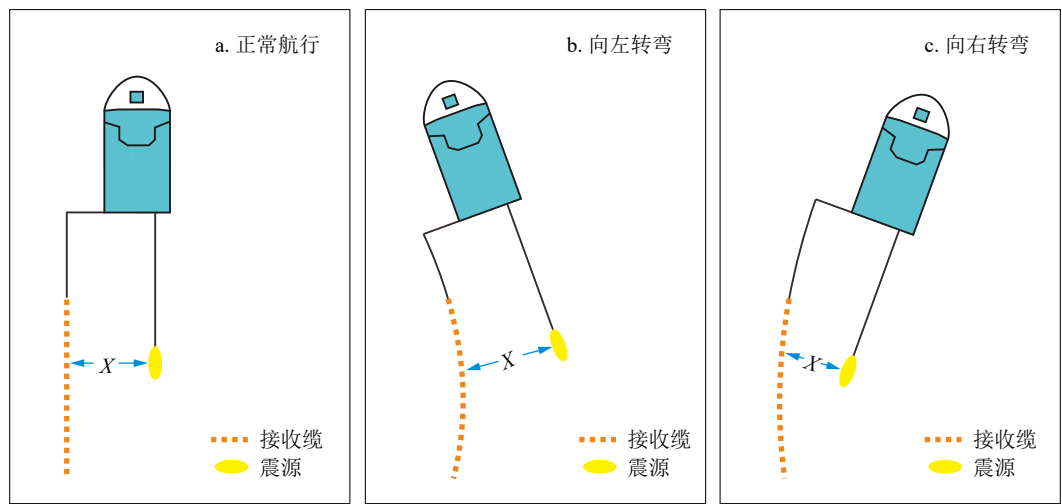


图 6 船舶急转弯对缆源间距的影响示意图

Fig.6 The effect of sharp turns of ships on the spacing between cable and source

的又一原因,在剖面上可通过海底同相轴波动的规律性和直达波特征将二者区分开。

(4)本文提出的方法虽然可以将海底恢复至真实形态,但无法消除调查船急转弯对海底以下地层产生的形变,相关处理方法有待进一步研究。

针对以上问题提出如下建议:

(1)测深仪、DGPS、震源中心、电缆中心等各

设备间精确的相对位置关系是推算反射点实际位置的关键,因此在施工前需要使用专业测量工具准确量取。

(2)涌浪姿态传感器的使用是保证本文方法能够良好实现的基础和前提,在同步采集单波束数据过程中,必须装配该设备。

(3)在单道地震施工过程中要尽量避免调查船

发生急转弯,驾驶人员在操船时要谨慎专注、加强瞭望,发现障碍物后应提前选择缓慢绕行;如果有条件的話,也可以对受影响的部分进行重新采集。

致谢: 感谢海口海洋地质调查中心所有海上作业人员对资料采集的辛苦付出,感谢青岛海洋地质研究所刘鸿副研究员在原始资料处理方面给予的支持和帮助。

参考文献 (References)

- [1] 褚宏宪, 杨源, 张晓波, 等. 高分辨率单道地震调查数据采集技术方法[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(12): 70-74. [CHU Hongxian, YANG Yuan, ZHANG Xiaobo et al. Data acquisition technique for high resolution single-channel seismic survey [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(12): 70-74.]
- [2] 杨慧良, 陆凯, 褚宏宪. 海洋地质地球物理调查技术方法发展趋势探讨[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(9): 1-5. [YANG Huiliang, LU Kai, CHU Hongxian. Future development trend of marine geological and geophysical survey techniques and methods [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(9): 1-5.]
- [3] 李丽青, 徐华宁, 舒虎. 涌浪静校正技术在海洋单道地震资料处理中的应用[J]. *物探与化探*, 2007(4): 339-343. [LI Liqing, XU Huaning, SHU Hu. The application of the wave static correction method of marine single-channel seismic data processing [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007(4): 339-343.]
- [4] 罗进华, 潘国富, 丁维凤. 消除涌浪对海底声学地层剖面影响的处理技术研究[J]. *声学技术*, 2009, 28(1): 21-24. [LUO Jinhua, PAN Fuguo, DING Weifeng. Research on processing technique of eliminating wave-induced distortion effect on sub-bottom profile [J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28(1): 21-24.]
- [5] 丁维凤, 冯霞, 傅晓明, 等. 海上单道地震与浅地层剖面数据海浪改正处理研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(4): 91-98. [DING Weifeng, FENG Xia, FU Xiaoming et al. Marine wave correction research on single channel seismic data and a subbottom profile [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(4): 91-98.]
- [6] 付小波, 余嘉顺, 侯小平. 单道地震浪静校正技术研究[C]//中国石油学会2019年物探技术研讨会论文集. 2019: 561-564. [FU Xiaobo, YU Jiashun, HOU Xiaoping. Research on wave static correction technology of single channel seismic[C]// Conference Proceedings of 2019 Annual Geophysical Technology of Chinese Petroleum Society, 2019: 561-564.]
- [7] 张彬彬, 吴永亨, 张海泉, 等. 浅地层剖面仪剩余涌浪影响分析及消除方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(2): 834-839. [ZHANG Binbin, WU Yongting, ZHANG Haiquan et al. Research on the residual swell impact analysis and elimination method of the sub-bottom profiler [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(2): 834-839.]
- [8] Kim Y J, Koo N H, Riedel M et al. A case study on swell correction of Chirp sub-bottom profiler (SBP) data using multi-beam echo sounder (MBES) data [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017(145): 100-110.
- [9] 郝高建, 年永吉, 罗进华, 等. 一种中浅地层剖面高精度成像的处理方法[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2437-2443. [HAO Gaojian, NIAN Yongji, LUO Jinhua et al. Method of medium and shallow sub-bottom profile data processing for high precision imaging [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2437-2443.]
- [10] 刘伍. 上海近岸海域高分辨率单道地震探测海浪干扰及其压制方法[J]. *上海国土资源*, 2015, 36(4): 93-98. [LIU Wu. Methods of noise suppression associated with high-resolution single-channel seismic vibrations in Shanghai offshore areas [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2015, 36(4): 93-98.]
- [11] 王圣民, 库汉鹏, 胡凯翔. 涌浪校正正在舟山海域高分辨率单道地震探测中的应用[J]. *现代盐化工*, 2018, 45(3): 29-30. [WANG Shengmin, KU Hanpeng, HU Kaixiang. Application of swell correction in high-resolution single channel seismic exploration in Zhoushan sea area [J]. *Modern Salt and Chemical Industry*, 2018, 45(3): 29-30.]
- [12] 徐岩, 刘玉萍, 曾凡祥. 涌浪静校正正在浅地层剖面资料处理中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(7): 47-53. [XU Yan, LIU Yuping, ZENG Fanxiang. Application of wave static correction method to shallow profile data processing [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(7): 47-53.]
- [13] 刘玉萍, 李丽青, 赵斌, 等. 海洋低信噪比单道地震资料特点及处理策略[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(7): 25-33. [LIU Yuping, LI Liqing, ZHAO Bin, et al. The characteristics and processing methods of marine single-channel seismic data with low SNR [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(7): 25-33.]
- [14] 梁武南, 杨保岑, 舒晓明. 一体化单波束精密测深方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(03): 27-29,33. [LIANG Wunan, YANG Paocen, SHU Xiaoming. Study on precise integrated sounding of single beam system [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(03): 27-29,33.]
- [15] 褚宏宪, 史慧杰, 杨源, 等. 利用涌浪滤波器提高水深测量精度的实践[J]. *海洋测绘*, 2010, 30(4): 51-53,62. [CHU Hongxian, SHI Huijie, YANG Yuan et al. The application of surge wave filter to improve the accuracy of seabed topography [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2010, 30(4): 51-53,62.]
- [16] 曾凡祥, 马金凤, 徐岩. 南海北部浅地层剖面数据精细处理方法[J]. *地质学刊*, 2020, 44(4): 356-361. [ZENG Fanxiang, MA Jinfeng, XU Yan. Research of precise processing in sub-bottom profile data in northern South China Sea [J]. *Journal of Geology*, 2020, 44(4): 356-361.]
- [17] 蔺爱军, 胡毅, 林桂兰, 等. 海底沙波研究进展与展望[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(3): 1366-1377. [LIN Aijun, HU Yi, LIN Guilan et al. Progress and perspective of submarine sand waves researchs [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1366-1377.]
- [18] 李勇航, 牟泽霖, 倪玉根, 等. 海南东方近岸海底活动沙波的地球物理特征及其迁移机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(4): 27-35. [LI Yonghang, MU Zeling, NI Yugen et al. Geophysical characteristics and migration mechanism of active submarine and waves off the coast of Dongfang Hainan [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(4): 27-35.]