

张匡华, 王嘉琳, 全长亮, 等. 鬼波的受控因素及其对单道地震勘探的影响[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(1): 94-100.

ZHANG Kuanghua, WANG Jialin, TONG Changliang, et al. Controlling factors of ghosts and the effects on single-channel seismic exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(1): 94-100.

鬼波的受控因素及其对单道地震勘探的影响

张匡华^{1,2}, 王嘉琳^{1,2*}, 全长亮^{1,2,3}, 韩孝辉^{1,2}, 傅人康^{1,2}, 钟宙灿^{1,4}

(1 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206; 2 海南省海洋地质调查院, 海口 570206;

3 海南省地质测试研究中心, 海口 570206; 4 海南省地质综合勘察院, 海口 570206)

摘要: 鬼波影响地震勘探效果, 其中较为典型的是震源鬼波。震源鬼波的变化主要由于其相对一次有效反射地震波的延时决定。从鬼波的形成机理出发, 借助二维海平面及水平海底模型建立海底反射震源鬼波延时、震源沉放深度、作业水深与炮检距间的数学公式, 将确定的震源沉放深度和作业水深带入公式并实现可视化, 分析炮检距及震源沉放深度对震源鬼波的影响。结合作业中震源沉放深度的变化状态, 分析震源鬼波的间接控制因素的影响, 并通过实测数据进行验证。研究表明: 小炮检距作业有利于降低鬼波对地震勘探效果的破坏作用, 但是炮检距对深部数据影响较小, 在平面上大致限于作业水深小于炮检距的海域, 在纵向上的影响深度约为炮检距与作业水深的差值; 震源鬼波受震源沉放深度的影响要大大超过炮检距的影响, 当作业水深 < 15 m 时, 震源鬼波延时变动范围对震源沉放深度变化响应约为对同尺度炮检距变化响应的 5 倍; 海水面的起伏是导致震源鬼波变化的重要因素, 选择较好的海况条件作业有利于提高海底及地层反射同相轴波形的一致性及地震波能量的均衡性。

关键词: 单道地震; 鬼波; 炮检距; 沉放深度

中图分类号: P714; P315.9

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.320

0 引言

单道地震勘探以其操作简单、高效经济、探测范围广等特点被广泛应用于近浅海工程、环境地质调查中^[1-3], 其数据分辨率高、频带宽, 包含的地质信息丰富^[4], 能够达到非常好的地震勘探效果。由于未采用叠加技术, 使得单道地震数据能够保持较高的分辨率^[5], 鬼波致使海洋地震勘探数据产生陷

波效应, 限制数据的频带宽度, 影响数据的分辨率, 干扰真实地层反射的识别^[6-9], 在地震波的传播过程中应尽量减少这种影响, 但不可能完全避免这种影响^[10]。受“鬼波效应”的影响, 缆源的调谐组合参数与地震系统的接收频率直接相关, 对地震调查资料影响很大^[11], 震源和电缆的沉放深度越浅越有利于地震数据分辨率的提高^[5,12-14], 震源和电缆沉放深度受潮流、船速、配重量等多种因素影响, 地震采集船速控制宜采用稳定对水速度, 能合理地保证较稳定的震源、电缆沉放深度控制^[14]。过去有关鬼波控制因素及对地震数据影响的研究主要针对多道地震, 忽略了浅水区域作业炮检距对鬼波变化的影响。另外, 单道地震勘探在近浅海作业时震源沉放浅, 震源深度的变化状态对鬼波的稳定以及数据质量的影响相对较大, 因此, 有必要针对浅水区域开展相关的研究, 通过二维海平面及水平海底模型分析炮检距及震源沉放深度对鬼波相对一次有效反射地震波延时的影响, 并结合实测数据对处于变化状

收稿日期: 2022-12-07

资助项目: 海南省海洋地质资源与环境重点实验室自主课题(HNHYD-ZZYHJZZ003); 海南省自然科学基金“琼州海峡潮流沙脊动力地貌过程研究及稳定性评估”(422RC800); 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目(420LH029); 海南省财政厅项目“海南岛周边海域海砂资源调查评价”

第一作者: 张匡华(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质、地球物理调查方面的研究工作。E-mail: zkh_quest@163.com

* 通讯作者: 王嘉琳(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质、地球物理调查方面的研究工作。E-mail: 936661475@qq.com

态的各因素对鬼波及对数据质量的影响进行研究, 能为单道地震勘探炮检距设计及作业环境的选择提供理论依据, 有利于提高数据采集质量。

1 研究思路

研究大致可分为以下 4 个步骤:

(1) 从鬼波的形成机理出发, 对震源鬼波、接收点鬼波以及震源-接收点鬼波的特征进行分析。

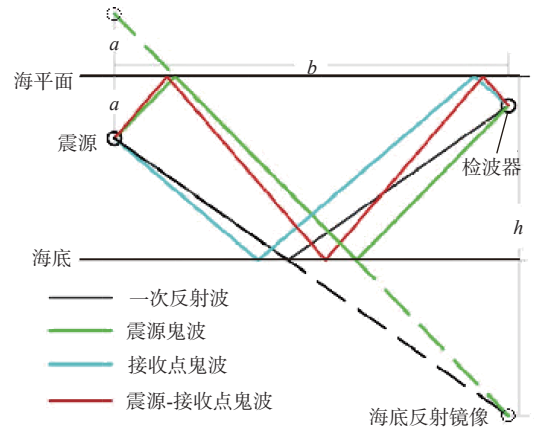
(2) 鬼波对地震数据的影响与鬼波相对一次有效反射地震波的延时直接相关^[12], 鬼波的变化主要由其相对一次有效反射地震波的延时变化导致。根据费马原理, 在已知震源、接收点以及鬼波类型的情况下, 可以确定其反射点和传播路径, 据此通过二维海平面及水平海底模型, 建立海底反射震源鬼波延时、震源沉放深度、作业水深与炮检距间的数学公式。

(3) 为方便分析炮检距在不同作业水深对海底反射震源鬼波延时的影响, 亦为方便根据作业水深设计炮检距, 假设炮检距和作业水深为线性关系, 可得到海底反射震源鬼波延时、震源沉放深度、作业水深、炮检距相对作业水深比值这 4 个参数之间的数学关系公式; 将确定的震源沉放深度和作业水深带入公式并实现可视化, 分析海底反射震源鬼波延时与炮检距相对作业水深的比值这两者间的关系, 并讨论震源沉放深度及炮检距对震源鬼波延时的影响。

(4) 在理想模型研究结果的基础上, 结合单道地震作业中震源沉放深度的变化状态, 分析引起震源鬼波延时改变的间接因素, 通过实测数据进行验证并对一般规律进行总结。

2 形成机理

在海域地震勘探中, 为了确保震源激发和接收点接收的均一性, 震源和水听器均被置于水中, 因受震源和水听器沉放深度影响而与水表发生反射作用的波伴随着一次有效反射波, 这种波被称作鬼波。根据其成因与传播路径的不同, 又可分为震源鬼波、接收点鬼波和震源-接收点鬼波^[15-16](图 1)。震源鬼波和接收点鬼波分别由震源和水听器沉置于水中导致, 在传播过程中经历了一次海水面反射, 由于海水面的反射系数近似等于-1^[12,17], 故 2 种鬼波均跟海底反射波的极性相反。震源-接收点鬼波



a 为震源沉放深度; b 为震源到检波器的水平距离, 即炮检距; $2 \times h$ 为反射点在海底的镜像到海平面的垂直距离, 由于水听器紧贴海平面, h 可视为作业水深; 上述参数的单位均为 m

据文献 [15] 修改

图 1 一次反射波和鬼波行走路径示意图

Fig.1 The traveling path of primary and ghosts

则因在传播过程中经历了 2 次海水面反射, 故跟海底反射波的极性相同。

单道地震勘探作业时, 水听器置于水中并紧贴海水面, 其沉放深度浅且变动范围小, 因此, 接收点鬼波对数据的影响相对稳定。同样, 由于水听器沉放深度浅, 震源鬼波跟震源-接收点鬼波的传播距离几乎相等, 也就意味着震源鬼波跟震源-接收点鬼波延时几乎相等, 据此下文选择对震源鬼波延时展开研究。

3 理想模型的建立

根据费马原理, 通过理想二维海平面及水平海底模型(图 1), 可得到海底一次有效反射波和其震源鬼波的传播距离, 分别如式(1)、(2)所示。

$$D_0 = \sqrt{(2h - a) + b^2} \quad (1)$$

$$D_1 = \sqrt{(2h + a) + b^2} \quad (2)$$

式中: D_0 为海底一次有效反射波的传播距离, m;

D_1 为海底反射震源鬼波的传播距离, m;

h 为作业水深, m;

a 为震源沉放深度, m;

b 为炮检距, m。

假设地震波在海水中传播的速度为 v , 则海底反射震源鬼波延时如式(3)所示。

$$t = \frac{D_1 - D_0}{v} \quad (3)$$

式中: t 为海底反射震源鬼波延时, s;

v 为地震波在海水中传播的速度, m/s。

将式(1)、(2)带入式(3), v 取经验值 1 500 m/s, 可得到海底反射震源鬼波延时:

$$t = \frac{\sqrt{(2h+a)+b^2} - \sqrt{(2h-a)+b^2}}{1.5} \quad (4)$$

从式(4)可以发现, 海底反射震源鬼波延时受震源沉放深度、作业水深和炮检距这三者共同影响。当炮检距为零($b=0$)时, 海底反射震源鬼波延时达到当前震源沉放深度下的最大值。

$$t_{\max} = \frac{2a}{1.5} \approx 1.333a \quad (5)$$

单道地震勘探不可能采用零炮检距作业, 炮检距一定大于零($b>0$), 随着作业水深的增加, 炮检距的影响越来越低, 海底反射震源鬼波延时逐渐增加并无限接近最大值($1.333a$)。同理, 炮检距的影响随着勘探深度的增加而降低, 震源鬼波延从上到下逐渐增加, 延时在每一道数据上都存在一个变动范围, 有效数据的震源鬼波延迟变动范围被限制在最大震源鬼波延时与海底反射震源鬼波延时的差值之内。由于单道地震最大有效可勘探深度远超过炮检距, 本文假设有效地震数据在底部的震源鬼波延时无限接近当前震源沉放深度下的最大值。

假设海底反射震源鬼波延时与其最大值的比值为 $k(k \leq 1)$, 则有

$$t = k \times t_{\max} \quad (6)$$

式中: t 为海底反射震源鬼波延时, ms;

k 为海底反射震源鬼波延时与当前震源沉放深度下的最大震源鬼波延时的比值;

$t_{\max}$ 为当前震源沉放深度下的最大震源鬼波延时, ms。

将式(5)、(6)带入式(4)并简化可得式(7)。

$$k = \frac{\sqrt{(2h+a)+b^2} - \sqrt{(2h-a)+b^2}}{2a} \quad (7)$$

通过式(7)可见, 海底反射震源鬼波延时与当前震源沉放深度下的最大震源鬼波延时的比值(k)受作业水深(h)、震源沉放深度(a)和炮检距(b)这三者共同影响。

为分析炮检距在不同作业水深对海底反射震源鬼波延时的影响, 假设炮检距和作业水深为线性关系, 即炮检距(b)为作业水深(h)的 n 倍, 则有式(8)。

$$b = n \times h \quad (8)$$

式中: n 为炮检距相对作业水深的比值。

将式(8)带入式(7)可得式(9)。

$$k = \frac{\sqrt{(2nb+a)+b^2} - \sqrt{(2nb-a)+b^2}}{2a} \quad (9)$$

4 讨论

4.1 震源鬼波延时变动范围在纵向上的控制因素

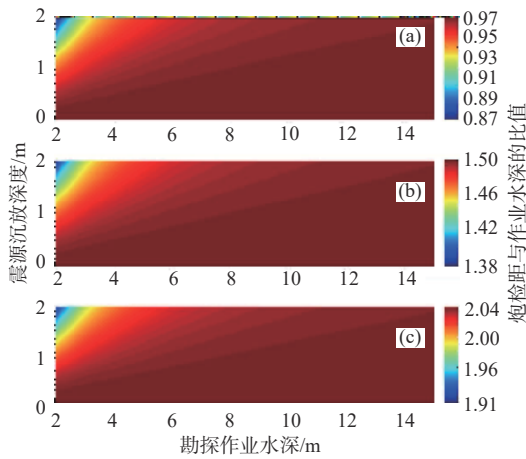
由于在浅水海域开展单道地震勘探工作, 震源沉放深度一般较浅, 对作业水深(h)取值 2.01~15 m, 对震源沉放深度(a)取值 0.01~2 m, 将海底反射震源鬼波延时与当前震源沉放深度下的最大震源鬼波延时的比值(k)分别取值 0.9、0.8 和 0.7, 带入式(9)后, 计算出炮检距相对作业水深的比值(n)的变化范围, 图 2a、2b 和 2c 分别反映了震源鬼波延时变动范围被限制在其最大值的 10%、20% 和 30% 时炮检距和作业水深的关系。

(1)对比图 2a、2b 和 2c 可见, 当作业水深固定时, 随着震源鬼波延时变动范围被限制在其最大值的 10%、20% 和 30% 时, 炮检距相对作业水深的比值(n)从 0.87~0.97 增加到 1.38~1.5, 再到 1.91~2.04, 此情况下炮检距逐渐增加。因此, 大炮检距作业会增加震源鬼波延时变动范围, 相反小炮检距能减小这个范围, 同理, 小炮检距也能减小震源-接受点鬼波延时变动范围。根据陷波公式^[12](式 10)可知, 震源鬼波延时影响地震数据的分辨率, 在频谱上表现为陷波点在不同的位置出现, 稳定的震源鬼波延时既有益于原始数据质量的提高, 也有利于后期对鬼波的压制处理, 因此, 小炮检距作业有利于降低鬼波对数据的破坏作用, 提高单道地震数据的采集质量。

$$f_n = n/t, \quad n = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: t 为震源鬼波延时, s。

(2)当作业水深从 15 m 减小到 2.01 m, 震源鬼波延时变动范围分别被限制在其最大值的 10%、20%、30% 时, 炮检距相对作业水深的比值(n)分别从 0.97 减小到 0.87、从 1.5 减小到 1.38、从 2.04 减小到 1.91(图 2)。相对于深水区域, 在浅水区域作业时, 震源鬼波延时变动范围稳定, 要求更小的炮检距与作业水深比值。当震源沉放深度较浅时($a \leq 2$), 炮检距略小于勘查区最小作业水深, 可将震源鬼波延时的变动范围限制在其最大值的 10% 以内。同理, 随着勘探深度的增加, 震源鬼波延时会迅速逼近其最大值($1.333a$), 因此, 炮检距对深部



(a) 延时变动范围为最大值的 10%; (b) 延时变动范围为最大值的 20%; (c) 延时变动范围为最大值的 30%

图 2 不同震源鬼波延时变动范围下作业水深与炮检距的比值

Fig.2 The ratio of water depth to source-receiver distance under different variation range of source-ghost time-delay

数据影响较小, 在平面上大约限于作业水深小于炮检距的海域, 在纵向上影响深度约为炮检距与作业水深的差值。

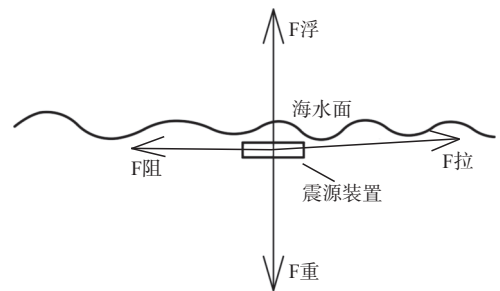
4.2 震源鬼波延时变动范围在横向上的控制因素

当震源沉放深度 < 2 m, 炮检距略小于最小作业水深(为 $0.87 \sim 0.97$ 倍)时, 可将震源鬼波延时的变动范围限制在当前震源沉放深度下最大值的 10% 以内(图 2); 当炮检距约为最小作业水深的 1.4 倍($1.38 \sim 1.5$ 倍)时, 可将震源鬼波延时的变动范围限制在当前震源沉放深度下最大值的 20% 以内; 当炮检距约为最小作业水深的 1.9 倍($1.91 \sim 2.04$ 倍)时, 可将震源鬼波延时的变动范围限制在当前震源沉放深度下最大值的 30% 以内。在作业水深、震源沉放深度不变的条件下, 炮检距增加 1 倍, 震源鬼波延时的变动范围约增加震源沉放深度的 0.2666 倍。从式(5)可知, 在作业水深、炮检距不变的条件下, 震源沉放深度增加 1 倍, 震源鬼波延时的变动范围约为震源沉放深度的 1.333 倍。鬼波延时变动范围对震源沉放深度改变的响应更敏感, 对炮检距变化的响应则要慢得多, 两者相差约 5 倍。另外, 在单道地震勘探作业中, 震源沉放深度和炮检距都处于变化状态, 其中, 震源沉放深度的变化相对幅度更大、频率更高。综上, 在水深 < 15 m 的海域作业, 震源鬼波延时变动范围受震源沉放深度的影响要大大超过炮检距的影响, 其对震源沉放深度变化响应约为对同尺度炮检距变化响

应的 5 倍。

4.3 震源鬼波延时变动范围在作业中的间接影响因素

通过上面分析可知, 震源沉放深度的变化直接造成了震源鬼波延时的变动。在实际作业中, 造成震源沉放深度变化的原因主要有 2 个: ①震源装置运动的状态; ②海水面的起伏状态导致震源装置沉放深度被动地发生变化。作业中震源装置受到电缆的拉力、海水的阻力、自身重力及浮力的共同作用(图 3), 平缓海水面条件下作业时, 震源装置受电缆拉力较为均衡, 其自身重力、海水的浮力及所受拉力在垂直方向上的分力处于相对平衡状态($F_{浮} \sim F_{重} + F_{拉垂}$), 震源装置始终保持较为稳定的沉放深度。在正常作业中, 电缆始终受力处于绷紧状态, 海水面起伏时, 震源装置被电缆拖拽穿过涌浪。当上覆水体变薄时, 震源沉放深度相对较小; 当上覆水体变厚时, 震源沉放深度相对较大。作业中震源装置所受合力处于变化状态, 但浮体提高了震源沉放深度的稳定性^[14], 能迫使震源装置恢复到平衡状态。在作业过程中, 较大的海水面起伏状态会导致震源沉放深度更不稳定, 而且海水面起伏对水听器沉放深度的影响和对震源沉放深度的影响类似。海况差时海水面出现较大的起伏, 会增加震源及水听器沉放深度的变化范围及变化频率, 进而影响到数据质量。



$F_{浮}$ 、 $F_{重}$ 、 $F_{拉}$ 、 $F_{阻}$ 分别为震源装置受到的浮力、自身重力、电缆拉力及在运动过程中受到的海水阻力, 其中,

$F_{拉}$ 在垂直方向的分力为 $F_{拉垂}$

图 3 震源装置受力分解示意图

Fig.3 The force distribution of the source device

5 实测数据分析

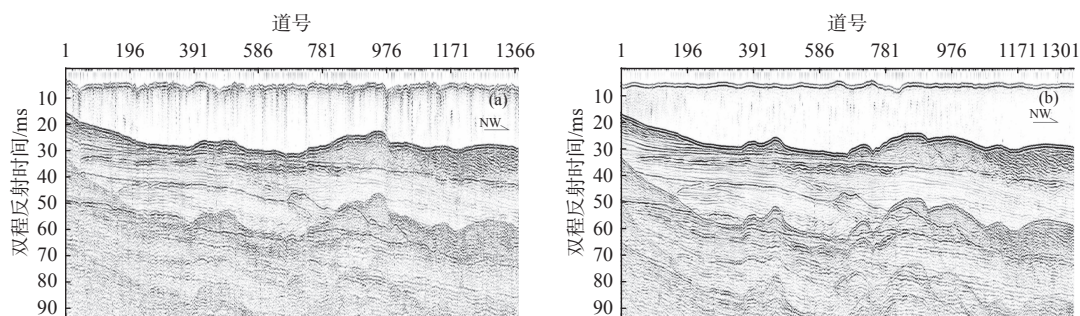
2023 年 3 月 2 日和 3 日在海南岛昌江海域同一条测线上开展了 2 次单道地震数据采集测试。测试设备为荷兰 Geo Marine Survey Systems, 其中,

数据采集系统型号为 Mini-Trace II; 电火花震源型号为 Geo-Spark 2000; 水听器电缆型号为 Geo-Sense Mini-Streamers, 包含了 30 cm 间隔的 24 个接收单元, 频率响应范围为 1~10 kHz。2 次测试采集参数设置相同, 其中, 震源在静止状态的沉放深度约为 0.25 m, 水听器漂浮在水面, 炮检距为 10 m, 拖缆长度为 41 m, 震源能量为 800 J, 采样间隔为 0.1 ms。另外, 2 次测试时震源及水听器的固定方式相同。3 月 2 日下午开展了首次测试, 试验区最大浪高约为 0.8 m, 作业时震源沉放深度时高时低, 变化幅度 <0.2 m; 3 月 3 日上午开展了第 2 次测试, 试验区最大浪高约为 0.2 m, 作业时震源沉放深度较为稳定。2 次测试时的流向皆为从 NE 至 WS 向, 航向皆为 NW 向, 且近似垂直于流向。另外, 2 次测试的平均船速分别为 5.16 和 5.30 节, 对应的平均道间距分别为 2.66 和 2.73 m。2 次测试共采集了 2 条单道地震剖面(图 4a、b)。

对比 0.8 m 浪高时采集的剖面(图 4a)和 0.2 m 浪高时采集的剖面(图 4b), 2 条剖面都具有较高分

辨率, 相对而言, 起伏海平面对应剖面(图 4a)的海底抖动剧烈、信噪低、反射同相轴不连续且波组特征不清晰; 平缓海平面对应剖面(图 4b)的海底抖动现象不明显、信噪比高、反射同相轴更为连续且波组特征清晰。将剖面局部放大后可见, 起伏海平面对应剖面(图 5a)的反射同相轴波形的一致性差, 地震波的波形变化大且能量不均衡; 平缓海平面对应剖面(图 5b)的反射同相轴波形的一致性较好, 地震波的波形更为稳定且能量更为均衡。可见在较好海况条件下作业时, 由于震源及水听器沉放深度更为稳定, 对应鬼波的延时相对固定, 致使地震波波形更为稳定, 能量更为均衡, 更有利于反映真实地质信息。

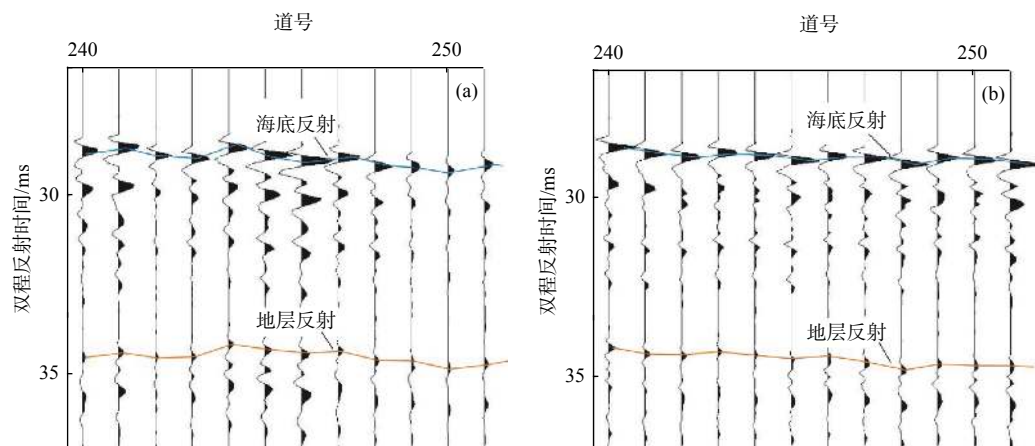
采用 200 Hz 高通滤波压制低频噪音后, 分别对 2 条剖面做频谱分析。2 条剖面对应的频谱曲线形态相似(如图 6 频率 f_1 、 f_2), 但由于海况差时地震波能量衰减得更快, 且高频信号更容易衰减, 因此, 海况差时所采集剖面的高频信号丢失的较多, 海况好时则高频信号保留得相对更多(图 6)。另外, 由



(a) 和 (b) 分别为在最大浪高约为 0.8 和 0.2 m 条件下采集的剖面

图 4 不同海况条件下采集的单道地震剖面

Fig.4 Single-channel seismic profiles acquired in different sea states

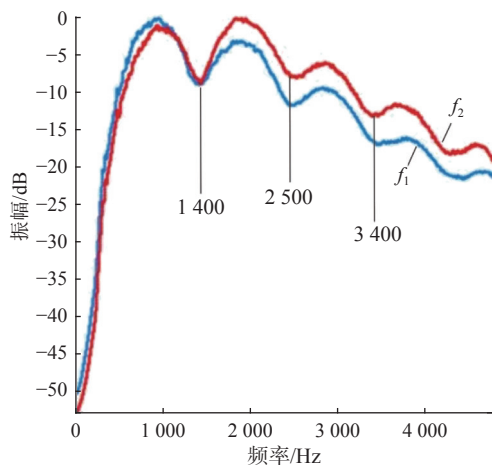


该图为图 4 的 240~251 道数据; (a) 为图 4a 放大; (b) 为图 4b 放大

图 5 单道地震剖面波形对比

Fig.5 Comparison in waveforms of single-channel seismic profiles

于受到鬼波陷波效应的影响,2条频谱曲线都呈现多峰特征,其凹陷点出现的位置几乎相同,对应的频率约为1 400、2 500和3 400 Hz。由于初始子波形态复杂且未知,单从频谱曲线难以判断出由鬼波导致的陷波点^[18]位置,但从2组频谱曲线高度相似的形态及接近的陷波点位置可判断,2次测试时震源的平均沉放深度接近。可见,平均沉放深度可以通过改进震源装置或改变固定方式等实现,但是不同海况会使震源及水听器的沉放深度处于不同变化范围,进而对单道地震数据产生不同影响。



f_1 对应最大浪高约为 0.8 m 条件下采集剖面;

f_2 对应最大浪高约为 0.2 m 条件下采集剖面

图6 不同海况条件下采集的单道地震剖面频谱分析

Fig.6 Spectrums of single-channel seismic profiles acquired in different sea states

6 结论

(1)小炮检距作业有利于降低鬼波对单道地震勘探效果的破坏作用,提高数据采集质量,但是炮检距对深部数据影响较小,在平面上大致限于作业水深小于炮检距的海域,在纵向上影响深度约为炮检距与作业水深的差值。

(2)对于作业水深<15 m的单道地震勘探,震源鬼波受震源沉放深度的影响要大大超过受炮检距的影响,震源鬼波延时变动范围对震源沉放深度变化响应约为对同尺度炮检距变化响应的5倍。

(3)海水面的起伏导致震源沉放深度被动发生变化是影响震源鬼波的重要因素,海况好时海水面

相对平缓,在该条件下开展单道地震数据采集,海底及地层反射同相轴波形的一致性会更好,且地震波的能量更为均衡。

参考文献:

- [1] 李丽青,陈泓君,彭学超,等.海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J].物探与化探,2011,35(1):86-92.
- [2] 张匡华,傅人康,张从伟,等.海南岛南部海棠湾晚更新世以来单道地震剖面特征[J].物探化探计算技术,2018,40(6):718-723.
- [3] MCGEE T M. High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes. Part A: acquiring analogue seismic signals[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(4): 271-285.
- [4] 戚宾,王祥春,赵庆献.海洋电火花震源地震勘探研究进展[J].物探与化探,2020,44(1):107-111.
- [5] 岳保静.单道地震资料处理方法及应用[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2010.
- [6] 李慧龙,王慕雨,王子秋,等.鬼波衰减在深水多次波衰减中的作用[J].地球物理学进展,2017,32(6):2650-2654.
- [7] 邓勇,彭海龙,裴健翔,等.海上地震资料子波提取鬼波压制技术[J].地球物理学进展,2020,35(1):281-286.
- [8] LARI H H, GHOLAMI A. Simultaneous deghosting and wavelet estimation via blind deconvolution[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 135: 183-190.
- [9] 唐进,杨凯,顾汉明,等.海上变深度缆地震采集宽频机理分析[J].地球物理学进展,2015,30(5):2386-2392.
- [10] 吕公河.地震勘探虚反射界面的测定及其利用[J].石油地球物理勘探,2002,37(3):295-299.
- [11] 伍忠良,曾宪军,陆敬安.海洋地震勘探直达波综合效应分析[J].海洋技术,2006,25(1):111-114.
- [12] 李洪建.海洋宽频地震勘探方法与应用研究[D].吉林:吉林大学,2016.
- [13] 钟明睿,朱江梅,杨薇,等.震源及电缆沉放深度对海上地震资料的影响[J].物探与化探,2012,36(1):78-83,88.
- [14] 褚宏宪,梅赛,史慧杰,等.海洋短排列高分辨率地震拖缆沉放深度测试分析[J].海洋地质前沿,2020,36(12):65-71.
- [15] 支明,郝重涛,姚陈,等.基于海域地震资料的多次波及其鬼波的时距解释[J].地震地质,2020,42(1):226-244.
- [16] 王惠东.海上单道地震资料处理与鬼波去除方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.
- [17] PEI Y L, KAN G M, ZHANG L C, et al. Characteristics of source wavelets generated by two sparkers[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 170: 103819.
- [18] 陆敬安,伍忠良,曾宪军.海洋地震勘探中地震波、鬼波综合效应分析与应用[J].海洋技术,2006,25(4):76-78.

Controlling factors of ghosts and the effects on single-channel seismic exploration

ZHANG Kuanghua^{1,2}, WANG Jialin^{1,2*}, TONG Changliang^{1,2,3},
HAN Xiaohui^{1,2}, FU Renkang^{1,2}, ZHONG Zhoucan^{1,4}

(1 Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China;

2 Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China;

3 Hainan Geology Detection and Research Centre, Haikou 570206, China;

4 Comprehensive Geologic Survey of Hainan Province, Haikou 570206, China)

Abstract: Source ghost and other ghosts affect the quality of marine seismic exploration. The variation of source ghost is mainly controlled by its time-delay relative to the primary. Based on the theories of ghosts and the two-dimensional model supposing sea surface and seabed are horizontal, the formulas including source ghost time-delay, source depth, and source-receiver distance were established. The relationship between source-receiver distance and source depth was visualized and analyzed when real values are taken into the formulas, through which the effects on source ghost could be determined using the source-receiver distance and source depth. After that, the indirect controlling factors of source ghost were studied when the changes of source depth during exploration were taken into account, and the results were verified by factual seismic profiles. Research shows that the shorter source-receiver distance, the more conducive to reducing the damage of ghosts to seismic exploration results. The source-receiver distance has a small impact on deep exploration results, only on the data acquired in where water depth is less than the source-receiver distance, and the affected length of the data is between seabed and the length of the source-receiver distance below seabed. The effect of the source-depth to the source ghost is much greater than that of the source-receiver distance. When water depth is less than 15 m, the response of the variation range of ghost time-delay to the variation of focal depth is about 5 times that of the response to the variation of offset on the same scale. The fluctuation of the sea surface is an important factor leading to the change of the ghosts. The exploration under good sea conditions is conducive to improving the resolution of single channel seismic data and the consistency of its reflection event.

Key words: single-channel seismic; ghosts; source-receiver distance; source depth