

# 针对海上开发区的多船宽方位地震 采集观测系统优化设计 ——以东海西湖凹陷为例

姜 雨<sup>1</sup>, 陈 华<sup>1</sup>, 姚 刚<sup>1</sup>, 李艳青<sup>2</sup>

(1 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2 中海油田服务股份有限公司, 天津 300451)

**摘 要:**随着海上已发现油气田陆续进入开发和生产阶段,对于地震资料品质的要求也越来越高。从传统宽方位施工方式出发,结合该区实际地质条件和目前装备技术现状,通过对采集航次和震源船配置关系的改变,设计出满足地质需求的多船宽方位观测系统。在实际采集的过程中,考虑到海上平台的影响,又采取变观措施对原观测系统无法实施的测线进行了补充,最终形成了一套针对海上开发区的多船宽方位地震采集观测系统设计方案,对类似地区的作业具有借鉴意义。

**关键词:**宽方位;采集设计;变观设计;西湖凹陷

**中图分类号:** P631.46

**文献标识码:** A

**DOI:**10.16028/j.1009-2722.2016.11007

东海西湖凹陷经过多年的勘探,取得了一系列的油气发现<sup>[1]</sup>,随着勘探开发进程的不断深入,对于地震资料品质的要求也越来越高,尤其是进入油气田开发和生产阶段以后,对目的层系构造精确成像和储层特征精细描述的需求十分迫切。以往从兼顾采集资料品质和施工效率的角度考虑,国内海上三维地震采集大多采用单船拖缆的施工方式。但是由于勘探领域的扩展和勘探目标的日益复杂,常规单船拖缆地震勘探作业方式已经逐渐不能满足复杂地区的需求,因此发展出很多新的地震采集作业方式<sup>[2-12]</sup>。海上拖缆多船宽方位采集方式从增加地下反射面元的方位角信息,改善中深层复杂构造的照明度出发,对地下特别是复杂构造的地震成像起到了良好的效果。

由于海上拖缆多船宽方位采集需要的作业资源多,采集成本相对常规单船拖缆采集往往有大

幅的增加,因此,作业之前的观测系统设计和优化对于在保证成像效果的前提下节约采集作业成本至关重要。

## 1 传统多船宽方位地震采集观测系统

在三维地震勘探理论中,一个独立面元内接收到的反射信息根据方位角一般可以划分为 4 个象限,理想的宽方位观测系统面元的 4 个象限内反射信息相对均匀分布。

为了达到上述目的,海上拖缆多船宽方位采集方案设计需要考虑以下几个因素:主船和震源船配置;航向设计与束线设计;最大非纵距(即震源与拖缆横向的最大距离);滚动间距。设计的基本流程一般是首先考虑设计辅助震源船与拖缆船的相对位置关系,得到对应的基本炮检象限分布,根据不同的船舶配置(单翼或者双翼),首个航次可能得到一个或者两个象限的采集信息,然后通过不同采集航向的设计,得到其他象限的采集信

收稿日期:2016-05-30

作者简介:姜 雨(1980—),男,硕士,工程师,主要从事海上地震采集处理的技术管理工作。E-mail:jiangyu@cnooc.com.cn

息。再根据勘探目标需求,设计合理的滚动距来拉宽方位角进而获得一定次数的横向覆盖。

一个比较典型的传统多船宽方位地震采集观测系统就是“3 船双翼双向 8 航次”施工模式(图 1)。在该采集方案中,船舶配置为 1 条 12 缆主船和 2 条震源船,2 条震源船分别位于主船两侧,连线与主船在一条直线上。每束航行线在一个方向上设计 4 个航次,第 1 航次 2 条辅助震源船分别

与主船相距 1 200 m,之后各航次相应往外侧拓展 1 200 m,完成 4 个航次的采集,这样单束航行线沿同一方向施工获得 2 个象限的采集信息。完成一个方向的束线采集施工后,采用相同模式再沿同束航行线反方向施工 4 个航次,得到另外 2 个象限的采集信息,也即同一束航行线正反 2 个方向共完成 8 次施工,获得 4 个象限对称分布的宽方位采集信息(图 2)。

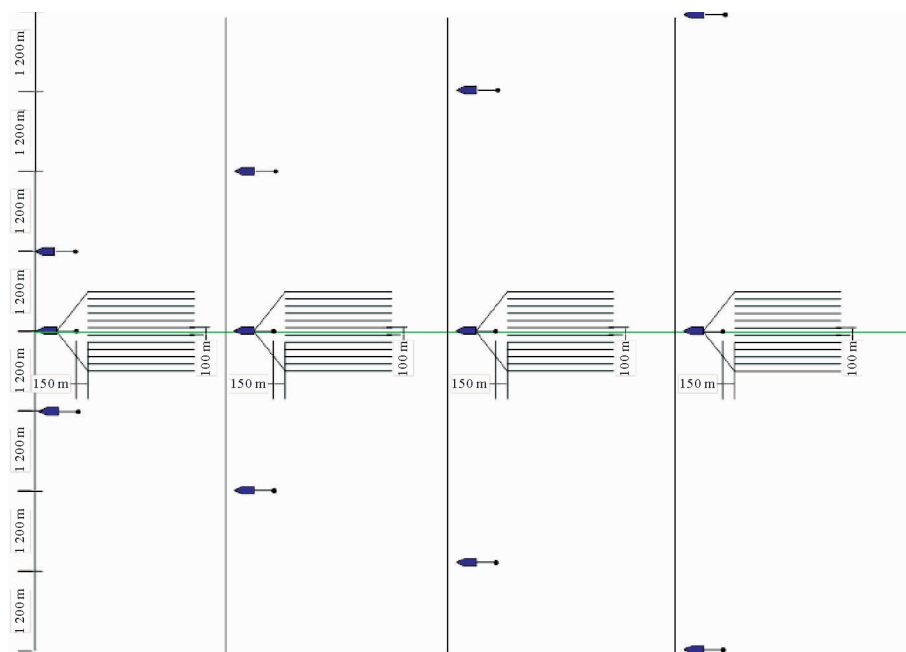


图 1 传统 3 船双翼双向 8 航次宽方位采集模式(其中 1 个方向)

Fig. 1 3-vessels/2-wings/2-directions/8-voyages wide-azimuth acquisition model (one of the 2-directions)

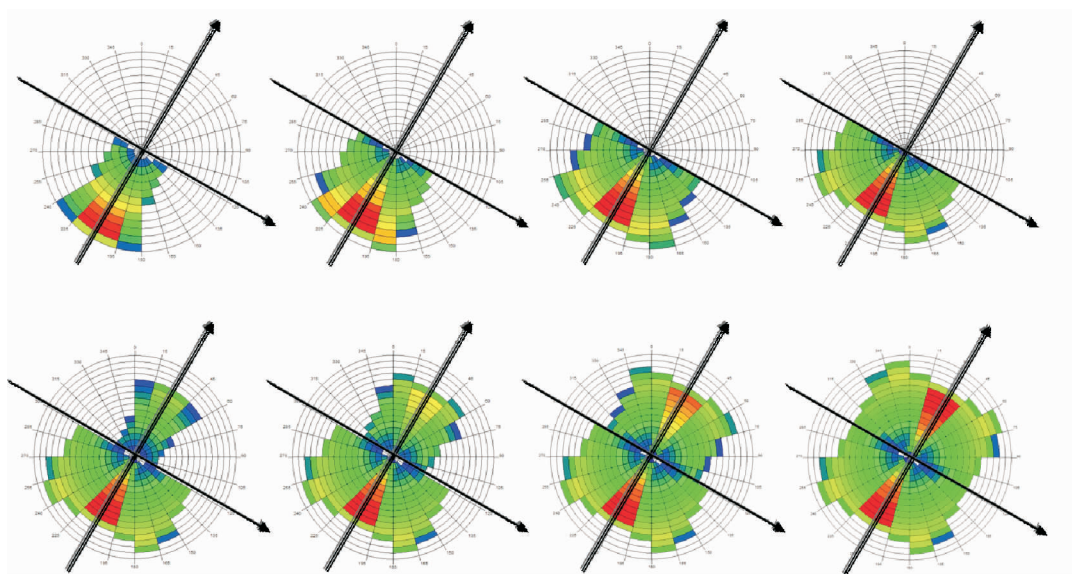


图 2 传统 3 船双翼双向 8 航次宽方位采集每个航次对应的方位角玫瑰图

Fig. 2 Rose diagram to each voyage of 3-vessels/2-wings/2-directions/8-voyages wide-azimuth acquisition

## 2 多船宽方位观测系统设计优化

上述传统 3 船双翼双向 8 航次宽方位观测系统的基本设计方案中,为了获得较大的横纵比,同一束航行线通过拉开辅助震源船与主船之间的距离,设计了正反各 4 个航次的采集,而这只是一束线的采集工作量,考虑大面积工区施工,为保证不同面元内属性的一致性,还需要按照一定的滚动距进行横向滚动,因此,该宽方位采集设计方案的施工成本相当昂贵,需要进行优化。

### 2.1 采集航次对成像效果的影响

宽方位采集观测系统通过设计同一束航行线正反多次采集,实现单一面元内具有 4 个象限的采集信息。根据炮检互换原理,在解决地质问题的前提下,从成像效果和照明分析两个方面试验能否通过采集航次的优化,采用 2 个甚至 1 个象限的信息来实现宽方位采集,增强该采集方式的经济性。

首先以前期开展的单束线宽方位采集试验资料为例进行分析,分别按照 4 个象限、2 个象限以

及 1 个象限资料进行处理,对比分析象限蜕化后与 4 个完整象限采集信息的处理成像效果。

从前期宽方位试验资料的蜕化处理结果(图 3~5)来看,即使只采用 1 个象限处理的结果成像与常规窄方位角拖缆采集相比也会得到较大的改善。在不考虑各向异性影响的情况下,由 4 个象限蜕化到 2 个和 1 个象限处理得到的成像效果略微有所变差,特别是有些区域层间小断裂构造的接触关系变模糊,横向分辨率也稍稍有所降低,但总体成像效果变化不大。

下面再试验针对已有地质模型,不考虑各向异性影响的情况下,进行象限的蜕化照明,分析改变采集航次对照明度的影响。如图 6~8 所示,基于 4 个象限的照明结果要略好于 1 个象限和 2 个象限的照明结果,1 个象限和 2 个象限的照明结果相当。

### 2.2 船舶配置关系(单翼和双翼)对成像效果的影响

综合考虑技术、成本以及施工的可行性,提出两种待优选的 3 船宽方位采集方案,分别为双翼 A 方式和单翼 B 方式。双翼采集方式主要是指主

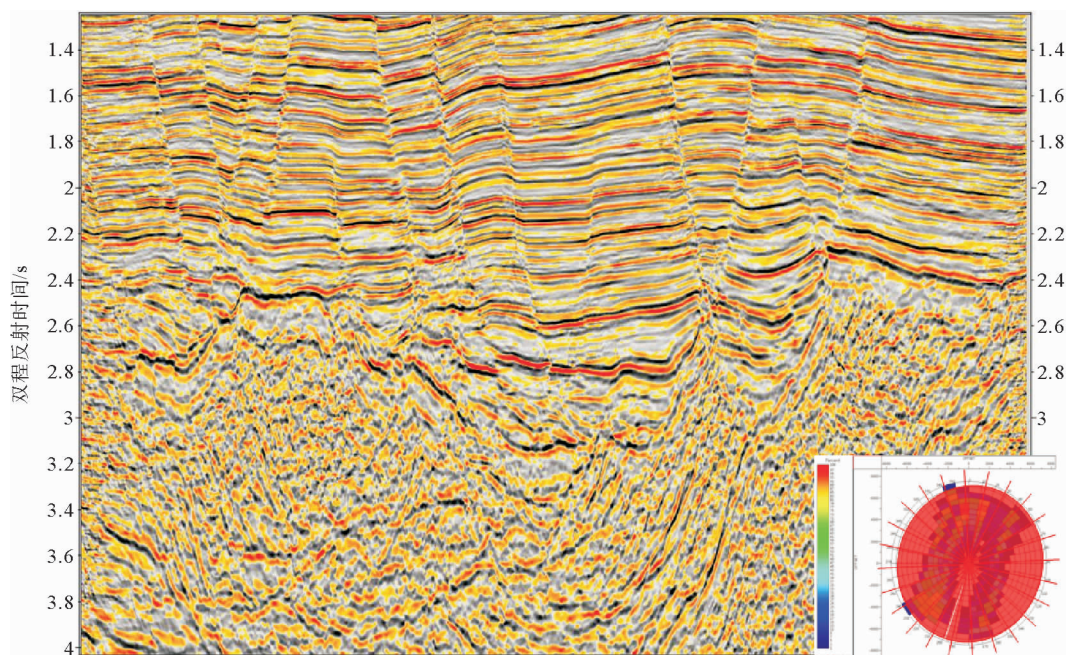


图 3 宽方位试验资料 4 个象限资料的处理剖面

Fig. 3 Processed profile of wide-azimuth experiment with 4 quadrants

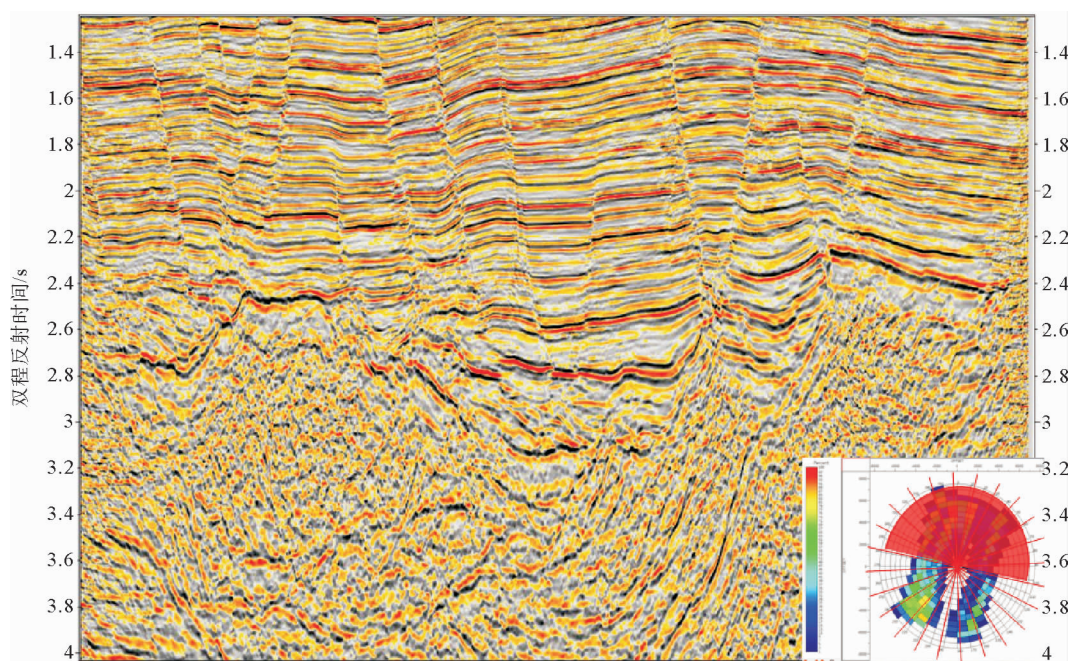


图 4 宽方位试验资料蜕化到 2 个象限的资料处理剖面

Fig. 4 Processed profile of wide-azimuth experiment with 2 quadrants

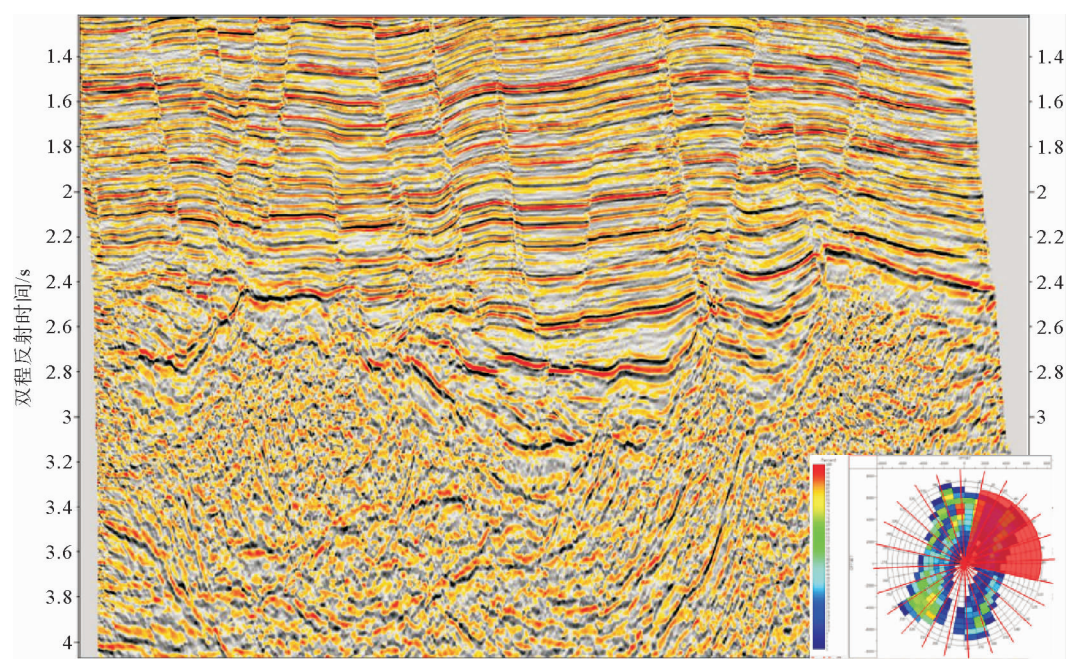


图 5 宽方位试验资料蜕化为 1 个象限的资料处理剖面

Fig. 5 Progress profile of wide-azimuth experiment with 1 quadrant

船在中间,2 条辅助震源船在主船两翼;单翼采集方式则是指主船在中间,2 条辅助震源船在主船同一侧。

方案 A 双翼宽方位观测系统的采集配置,拖

带 12 缆的主船位于中间位置,两侧各配 1 条辅助震源船,初始与主船间隔 1 200 m,3 船各配备单源进行交替激发,完成 1 次单束航航行线采集后,辅助震源船往外再拉开 1 200 m,沿同一束航行

线完成 1 次采集,如图 9A 所示,得到 2 个象限的采集信息,该方案的最大非纵距为 2 950 m,纵横比约为 0.48。

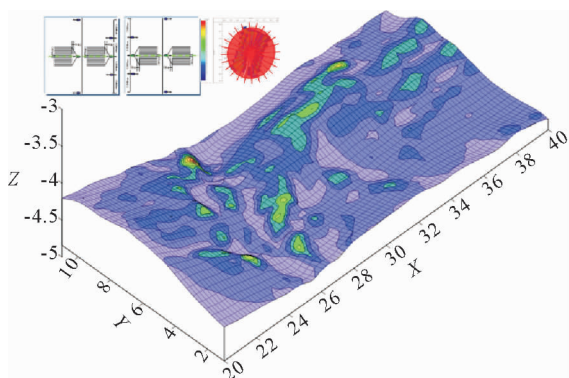


图 6 4 个象限模型照明结果

Fig. 6 Illumination result of 4 quadrants

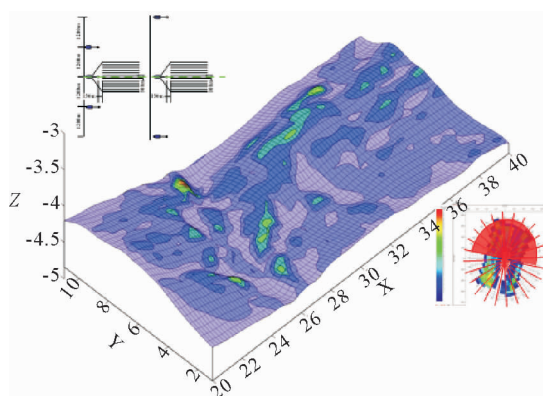


图 7 2 个象限模型照明结果

Fig. 7 Illumination result of 2 quadrants

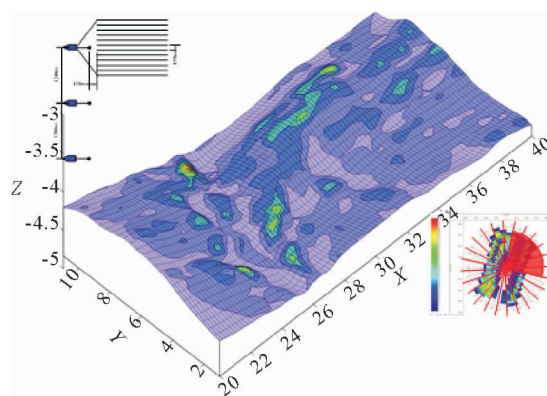


图 8 1 个象限模型照明结果

Fig. 8 Illumination result of 1 quadrant

方案 B 单翼宽方位观测系统的采集配置,主船为 12 缆,两条辅助震源船位于主船的同一侧,分别间隔 1 200 m 和 2 400 m,3 船单源交替激发,完成 1 次单束航次采集后,辅助震源船往外再分别拉开到 3 600 m 和 4 800 m,沿同一束航行线再进行 1 次采集,如图 9B 所示,得到单个象限的采集信息,该方案的最大非纵距 5 350 m,纵横比约为 0.87。

通过对比可知,双翼采集方式纵横比要小一些,生成的方位角相对较窄,但对称性较好;单翼采集方式通过在一侧拉宽辅助震源船与主船的垂向距离来增大单个面元内的方位角信息分布,也即在不影响 Inline 方向的方位角分布的情况下,增大了 Crossline 方向的方位角采集信息,因此,纵横比要大一些,生成的方位角较宽,对称性则差一些。

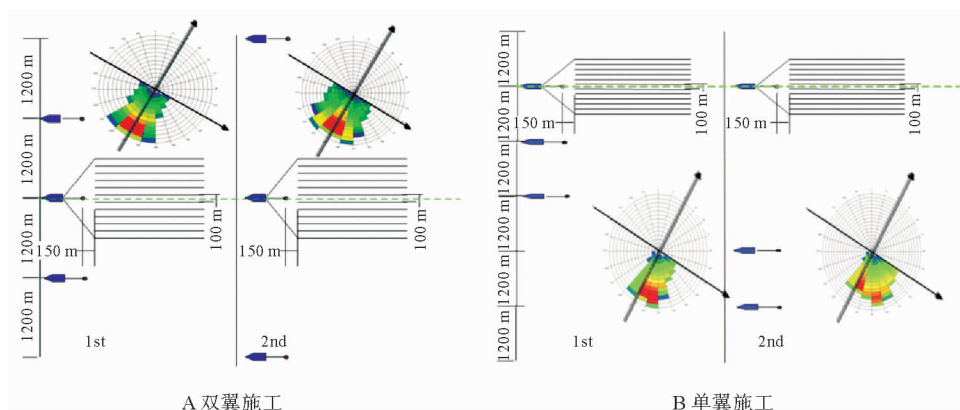
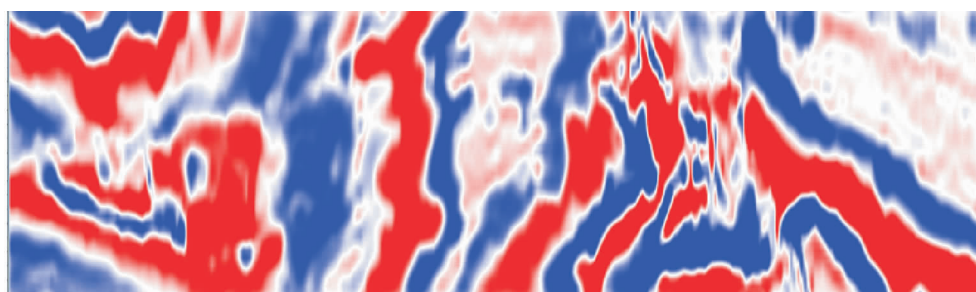


图 9 双翼与单翼施工方式及玫瑰图对比

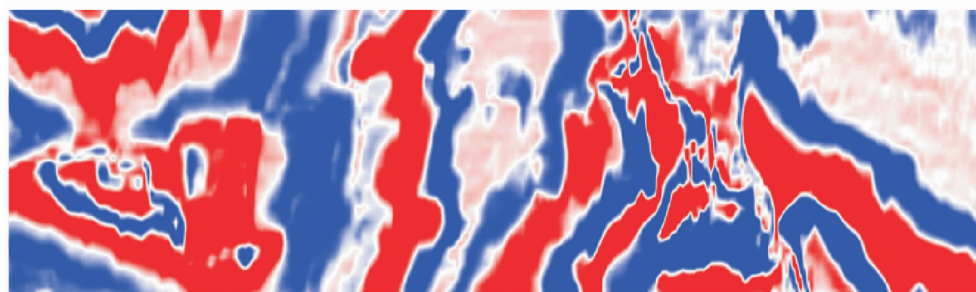
Fig. 9 Rose diagram contrast between 2-wings and 1-wing acquisition

图 10 为选取的模型区采用不同宽窄方位观测系统所获得的正演模拟深度切片对比图,模型对应深度为 4 500 m。其中 A 为常规 12 缆窄方位正演模拟结果,B 为设计的 3 船双翼宽方位观

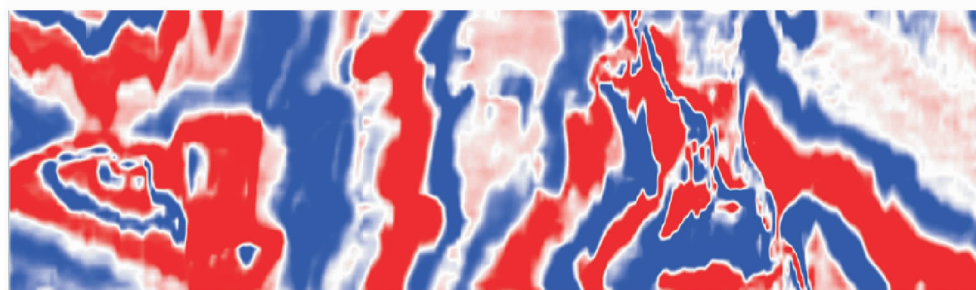
测系统正演模拟结果,C 为设计的 3 船单翼宽方位观测系统正演模拟结果,D 为对应的模型反射系数,作为不同观测系统模拟结果的评价标准。由图可见,无论是双翼还是单翼,两种宽方位观测



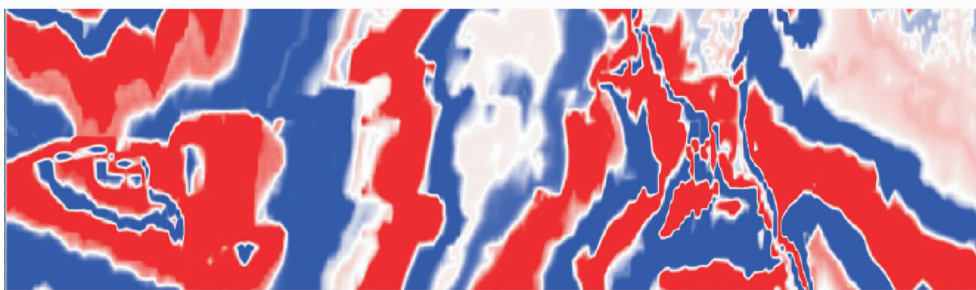
A 12缆窄方位观测系统正演深度切片



B 方案A双翼宽方位观测系统正演深度切片



C 方案B单翼宽方位观测系统正演深度切片



D 正演深度切片对应的模型反射系数

图 10 选取的模型区各个观测系统正演模拟深度切片

Fig. 10 Forward modeling depth slices to each observation system in the model area

系统的正演模拟效果基本相当,而相较于常规 12 缆观测系统的正演模拟结果,宽方位观测系统对构造的细节刻画、小断层断点的识别、构造的接触关系等显著改善。

通过前述论证和对比分析,可以得到以下结论:

(1) 针对试验资料进行蜕化处理表明,宽方位采集 4 个象限与 2 个象限、1 个象限的成像效果相差不大;

(2) 采用双翼方案和单翼方案的正演成像效果基本相当;

(3) 考虑工区实际施工条件限制,单翼施工方案更有利于实际实施。

因此使用 3 船单向 2 航次与传统的 3 船双向 8 航次在该地区对地下成像效果相当,但是作业成本则大为减少。考虑到单向 2 航次的横向覆盖较原方案减少较多,可以适当改变最大非纵距和滚动束距来增加横向覆盖。另外,为了增加近偏移距信息,可以把两条震源船适当后移,放到电缆中部。

### 3 最终设计方案

基于前面优化论述的结论,针对西湖凹陷勘探的采集技术要求,并结合现有采集设备能力,提出 3 船单向单翼 2 航次宽方位的基本采集设计方案,由 1 条 12 缆物探船和 2 条辅助震源船构成。2 条震源船位于主船右侧电缆中部,同时为了防止作业期间电缆尾部漂移,将靠近主船的那条震源船适当前移 1 000 m。

采集前绘设计的每条航迹线分别按照 T1 和 T2 的方式(图 11)行驶 2 次,第 1 遍施工的排列束线为 T1,其辅助震源船与主船中心间隔为 1 000 m/2 000 m,第 2 遍施工的排列束线为 T2,其辅助震源船与主船中心间隔拉开到 3 000 m/4 000 m,炮点间距为 18.75 m。为了使面元覆盖更加均匀,排列片 T1 和 T2 的同一束线在 Inline 方向错开 37.5 m,在 Crossline 方向则错开 12.5 m,这样形成的  $6.25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$  的面元,满覆盖区的覆盖次数为 160 次。

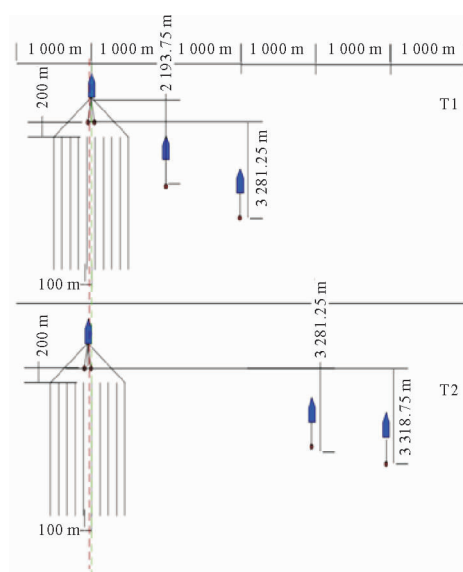


图 11 多船宽方位采集 T1+T2 作业方式示意图

Fig. 11 Multi-vessels wide-azimuth acquisition models of T1+T2

### 4 平台附近测线的变观方案

按照之前设计的 T1+T2 观测系统,平台附近有 3 条测线无法进行正常施工,导致该区近道面元缺失。通过现场正演模拟和论证,补充设计了 2 条 T3 变观测线(图 12)来替代之前无法施工的 3 条测线。该观测系统将两条炮船同样放在主船的右侧,连线与主船航行方向平行,炮船与主船行驶的航迹线相距 700 m。采用 T3 观测系统采集的两条测线分别位于平台的两侧,方向相反,两条测线之间相距 1 000 m(图 13)。

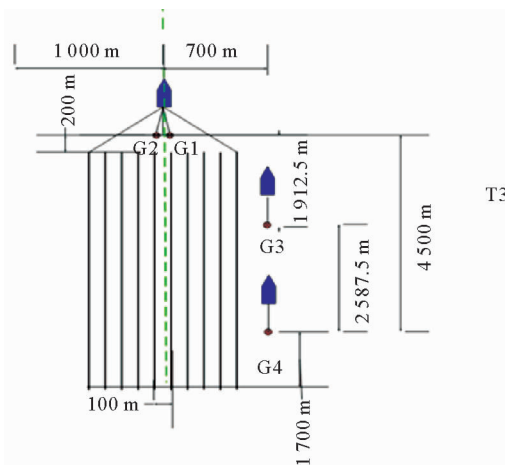


图 12 T3 观测系统示意图

Fig. 12 T3 observation system

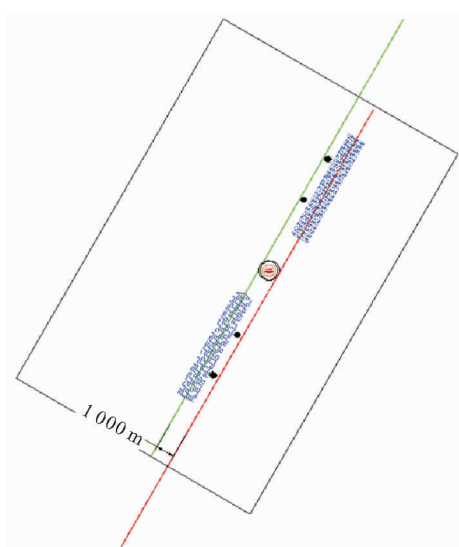


图 13 平台附近 2 条 T3 变观测线的位置

Fig. 13 Location of the two T3 lines near the plate

通过增加 2 条 T3 变观测线的采集,较好地解决了平台附近近道面元缺失的问题。从最终面元覆盖的统计结果来看,与之前相比,平台附近黄色区域近偏移距缺失的部分得到了充分的填补,工区内整体上面元覆盖更加均匀(图 14)。

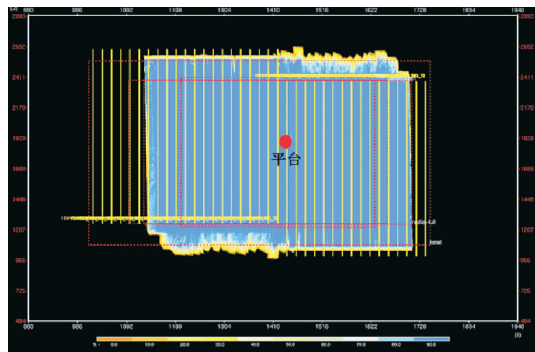


图 14 增加 2 条 T3 变观测线后  
工区近道面元覆盖图

Fig. 14 Near bin before(a)/after(b)  
2 lines acquisition of T3

## 5 结论

(1)通过借鉴前期宽方位采集试验资料的蜕

化处理 and 观测系统的优化分析,减少采集象限的宽方位观测系统方案不会对该地区构造的成像质量造成本质影响,能够得到相对可接受的成像效果;

(2)双翼采集和单翼采集各有优缺点,通过对该工区地质模型做正演模拟,两种方式采集对成像效果影响不大,可以根据实际情况加以选择;

(3)在遇到海上平台等障碍无法进行正常施工时,合理的设计变观系统可以很好的解决该问题;

(4)宽方位观测系统的施工工作量相对较大,在保证地质需求的情况下,需要尽可能兼顾技术、成本以及施工的可行性,加强对观测系统设计方案的优化论证分析研究。

### 参考文献:

- [1] 彭己君,张金川,唐玄,等.东海西湖凹陷非常规天然气分布序列与勘探潜力[J].中国海上油气,2014,26(6):21-27.
- [2] 谢玉洪,李列,袁全社,等.海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用[J].石油地球物理勘探,2012,47(3):431-435.
- [3] 张保庆,周辉,左黄金,等.宽方位地震资料处理技术及应用效果[J].石油地球物理勘探,2011,46(3):396-400.
- [4] Soubaras R, Dowle R. Variable-depth streamer-abroadband marine solution[J]. First Break, 2010, 28(11):89-86.
- [5] 狄帮让,孙作兴,顾培成,等.宽/窄方位三维观测系统对地震成像的影响分析[J].石油地球物理勘探,2007,42(1):1-6.
- [6] Robert Soubaras. Variable-depth streamer; deep towing and efficient deghosting for extended bandwidth[G]. SEG/EA-GE Research Workshop, 2010:289-292.
- [7] 张军华,朱焕,郑旭刚,等.宽方位角地震勘探技术评述[J].石油地球物理勘探,2007,42(5):603-609.
- [8] 张振波,李东方.斜缆宽频地震勘探技术在珠江口盆地的应用[J].石油地球物理勘探,2014,49(3):451-455.
- [9] Firth J. Broadband acquisition a step-change for deepwater imaging[J]. Advances in Marine Seismic, 2012.
- [10] 凌云研究小组.宽方位角地震勘探应用研究[J].石油地球物理勘探,2003,38(4):350-357.
- [11] 冯凯,和冠慧,尹成,等.宽方位三维观测系统的发展现状与趋势[J].西南石油学院学报,2006,28(6):24-28.
- [12] Robert S, Robert D. Variable-depth streamer—a broadband marine solution[J]. First Break, 2010, 28(12):89-96.

(下转第 62 页)

**Key words:** changing trace interval acquisition; loss of offset; angle gathers; optimizing process; parabola radon transform

# OPTIMIZATION OF WIDE-AZIMUTH OBSERVATION SYSTEM SPECIALLY FOR OFFSHORE PRODUCTION ZONE: A CASE FROM THE XIHU SAG

(1 Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China; 2 COSL Ltd., Tianjin 300451, China)

**Key words:** wide-azimuth; acquisition design; geometry-variable design; Xihu Sag