

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2008.06101

天然气水合物准三维地震调查导航定位技术

张 明, 彭朝旭, 沙志彬

(广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要: 随着我国天然气水合物调查工作进展到需要实施钻探阶段, 为了进一步提高水合物识别的准确度, 精确描述水合物矿体的外部形态及展布特征, 获取矿体准确的位置信息, 必须要提高导航定位的精度。在水合物调查的实践过程中, 根据单源单缆准三维地震的特殊性, 通过对定位网络配置、误差分析、数据处理等技术方法的建立, 有效地提高了定位精度并在实际的工作实践中取得了明显的效果, 为水合物的获取提供了有力的技术支持。

关键词: 天然气水合物; 准三维地震调查; 网络三节点法; 导航定位

中图分类号: P715 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2008)06-0101-06

20 世纪后期以来, 资源短缺特别是能源短缺问题日趋严重, 引起了国际社会普遍关注。为开辟新能源, 近 30 年来, 许多国家已把目光投向该新型能源的调查和开发利用研究上。天然气水合物作为 20 世纪后期发现的新型能源, 不仅储量巨大而且洁净环保, 是传统能源的理想替代品。一些开展天然气水合物勘查比较早的国家如美国、加拿大和日本等在天然气水合物钻前均开展了三维地震调查, 获得一批更详细的天然气水合物分布资料, 在天然气水合物钻探中取得了很好的效果。我国对海洋天然气水合物调查及研究工作起步较晚, 直到 20 世纪八九十年代, 天然气水合物调查才引起了国内相关单位和学者的注意, 相继开展了对国外天然气水合物资源调查的跟踪与研究, 并在南海北部陆坡区开展了二维地震调查、准三维地震调查和地质取样等相关工作。经过几年的调查与研究, 取得了长足的进展, 促进了我国在该领域的调查研究工作。但是天然气水合物赋存环境相对复杂, 调查海域的海水深度变化、海底地形起伏的坡度都比较大, 天然气水合物矿体的赋存具有不规则性, 而且其分布范围具有不均匀性。随着我国天然气水合物调查工作进展到需要实施钻探阶段, 为了进一步提高天然气水合物识别的准确度, 精确描述天然气水合物矿体的外部形态及展布特征, 获取矿体准确的位置信息, 应开展三维地震调查, 而在这方面首先要改善导航定位的方式, 因为导航定位精度的提高可以大幅度改善天

然气水合物准三维地震成像效果。因此, 天然气水合物准三维缆源定位技术是改善水合物地震成像质量的关键技术之一。根据单源单缆准三维调查的特殊性, 通过对定位网络配置、数据处理、质量监控和精度分析等技术方法的研究, 可达到提高定位精度的目的, 并在实际的工作实践中取得了明显的效果。

1 准三维定位网络配置

海上三维导航动态定位一般通过“三维定位网络法”来实现。三维定位网络一般分为前网、中网和后网等几个部分(图 1)。网络节点(或称为追踪点)是三维定位网络法中最关键的要素之一。节点定位质量将影响到整个导航定位网络的精度, 进而影响到电缆水听器位置的定位精度^[1]。因此, 网络节点是三维导航定位的基础, 前网是动态定位的重点。

节点定位必须通过相关设备的现场测量来提高定位精度。由于每种设备的定位质量都或多或少受到定位条件的制约, 因此, 多种定位设备进行位置的精确测量有利于提高节点的定位精度^[1]。

目前, 国内外使用的网络节点定位设备主要有以下几种: 差分 GPS (DGPS)、罗经 (GYRO)、声学测量系统和激光测量系统^[1]。

声学测量系统易受气泡等水下噪音的干扰而影响定位的稳定性和准确性, 因此, 需要众多的测量路径乃至激光测量系统作为补充。激光测量系统可用于测量震源(有时也测量电缆浮标)相对于船(激光发射器)的位置, 但可能会因天气和海况的影响而偶尔失灵, 因此, 它与声学测量系统共同使用时可以起到相辅相成的作用, 必要时也可以互相替代。激光和 RGPS 系统在单独放置时没有理论上的要求, 这

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2005AA611050, 2006AA09A202)

作者简介: 张 明(1957—), 男, 教授级高工, 主要从事石油和天然气水合物的地球物理勘探研究 E-mail: zhangming@gngs.com.cn

收稿日期: 2008-06-10; 改回日期: 2008-09-16. 周立君编辑

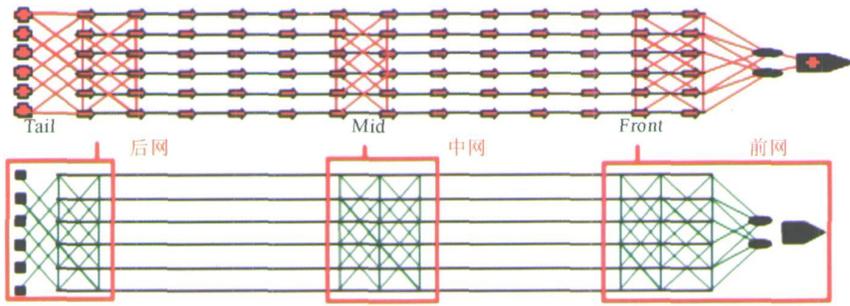


图1 三维定位网络法示意图

Fig. 1 Network for positioning of 3D seismic survey

是因为这两种系统均为单点可定位系统, 它们的共同之处是测量一对距离与方位值, 不同之处是 RGPS 为全天候系统, 作用距离最长达 12 km, 而激光系统受距离的限制, 最远为 1 500 m, 并且易受雪、雾、冰及激光束方向的影响, 所以, 激光镜一般在前网络中成对出现, 并以不同角度放置来进行定位^[3]。

由于前网节点的重要性以及定位的可能性, 前网采用的定位设备最多, 配置最全时, 所有节点定位设备均可用到。受设备作用距离、拖曳条件、噪音等因素的制约, 中网节点一般只采用声学测量系统。后网节点一般采用 RGPS 和声学测量系统进行定位。

此外, 还必须控制地震电缆的形状。电缆形状由电缆上所有罗盘的方向数据计算确定, 两个相邻罗盘之间的电缆由圆弧确定^[2]。电缆的罗盘定位法实际上是三维定位不可缺少的环节, 它的精度是目前三维定位最重要的环节。

目前, 国内在天然气水合物调查中, 野外一般使用单缆、单源(点震源)准三维地震资料采集方法。根据这一技术方法的特殊性, 为了满足定位精度要求, 我们根据网络定位法的基本原理, 在技术上将三维地震技术中的定位网络简化为单源、单缆模式, 并最终形成“网络定位三节点法”, 结合罗盘系统实现对电缆水听器组的定位。图 2 是某调查船在野外资料采集时的三节点法定位网络配置情况^[3]。

“网络定位三节点法”中的三节点分别为震源中心节点、电缆头标节点和电缆尾标节点。通过反复研究对比, 节点的定位最后均采用 RGPS 设备。

2 各节点位置的计算

2.1 震源中心定位

人工推算法: 首先, 根据船体安装的各种定位天线的相对位置(图 3), 通过罗经值, 计算船尾导航参考点的位置(以下简称 NRP 点)。然后, 根据震源中心到船尾的偏移距和罗经(或前 3 个罗盘的平均值), 计算震源中心的位置。

实时测量法: 由于网络节点关系到整个系统的定位精度, 因此, 对节点的定位精度要求比较严格。在人工推算法定位误差较大的情况下, 通过震源中心 RGPS 定位设备的研制, 最终实现了震源中心位置的实时测量, 提高了定位精度, 称之为实时测量法^[2]。

2.2 电缆头标定位

电缆头部作为头网节点之一, 直接关系到电缆道的定位精度, 因此, 节点的位置要尽量靠近第一道中心的位置。电缆头标节点也分为人工推算法和实时测量法两种基本方法。

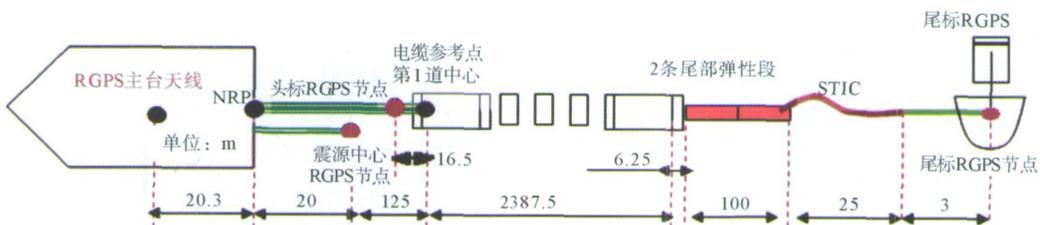


图2 “网络三节点法”定位网络配置示意图

Fig. 2 The arrangement of positioning network for 3-D single-channel seismic survey

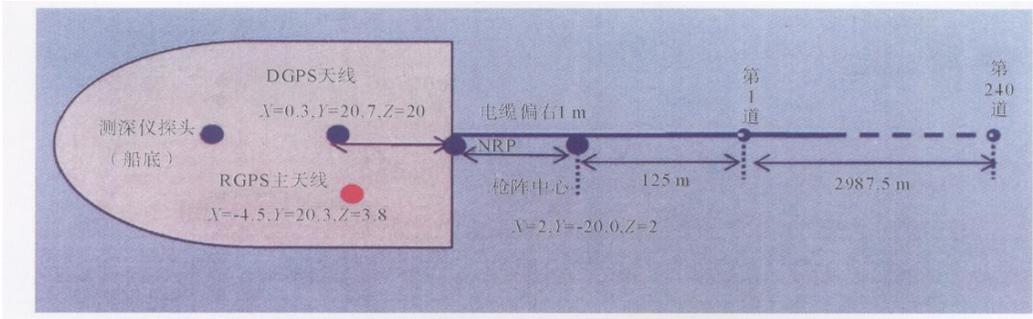


图 3 定位天线相对位置示意图

Fig. 3 Location of positioning antenna

注意: 头标是指浮在水面上的 RGPS 设备, 前网电缆头标节点是指头标 RGPS 投射到水下电缆上的“映射点”。

人工推算法: 通过 NRP 点的位置、偏移距和前 3 个罗盘数据, 计算得到第一道中心的位置。

实时测量法: 通过头标 RGPS 配套设备的研制, 解决了前网电缆头标节点的定位问题^[4]。

2.3 尾网节点

对于单源单缆来说, 尾网节点只有一个: 尾标 RGPS。尾标 RGPS 指水面上 RGPS 设备, 尾网节点指尾标 RGPS 垂直投射到水下电缆上的投影点。

3 地震电缆形状控制

“网络定位三节点法”中的节点主要用于确定定位基准点, 基准点之间电缆检波器组主要依靠罗盘数据来指示方向, 因此, 罗盘主要用来指示电缆形状(图 4), 从而实现电缆检波器组的定位。

海洋三维地震调查时, 罗盘一般均匀分布于电缆上, 分布间隔主要根据定位需要进行设置。经

过研究, 罗盘在电缆上的分布间距大约 300 m 是合适的。

影响罗盘误差主要因素有以下几个方面: 设备校准、地磁偏角、船磁影响、罗盘的精度、罗盘延迟(惰性)和数据处理质量等。

作业前, 需要对罗盘进行校准, 其精度应达到 0.01° , 每个罗盘的误差改正量应输入导航系统; 船磁对罗盘影响需要通过试验加以确定, 离船尾最近的罗盘应该放置在船磁影响距离之外, 且尽量靠近第 1 道中心; 作业前, 需要将地磁偏角数据输入导航系统进行改正; 罗盘延迟(惰性)分析, 需要根据电缆的配置, 试验不同羽角情况下罗盘延迟对定位精度的影响, 通过分析不同羽角情况下罗盘数据相邻炮点跳变(或 2~3 炮数据变化范围)情况对定位误差的影响, 在作业时, 结合数据处理和现场质量监控, 消除误差提高精度^[5]。

4 准三维导航数据处理

受海况、GPS 系统、罗盘、罗经、尾标系统、地震丢炮或人为操作等因素的影响, 可能使得野外导航

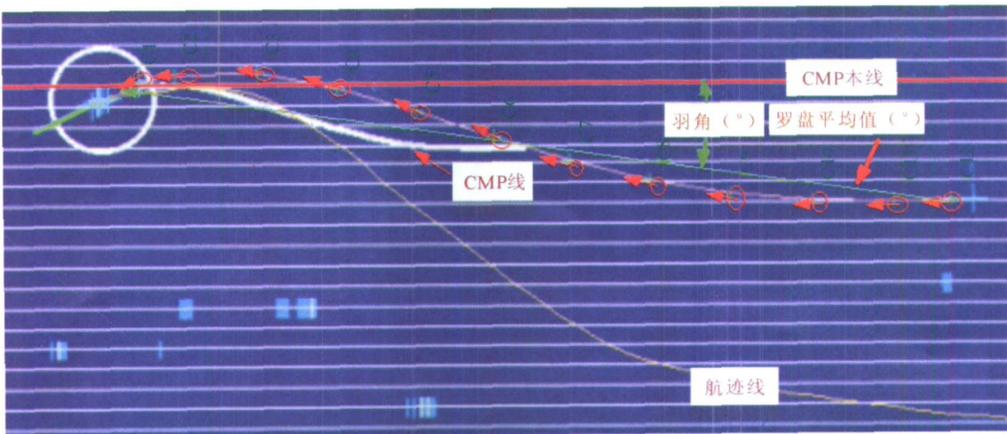


图 4 罗盘与电缆形状

Fig. 4 Determination of streamer using compass

定位数据存在一定的误差,因此,必须进行导航数据的处理,使导航数据更加接近真实值,从而达到提高导航定位精度的目的。

数据处理的基本流程如图 5 所示。

内容包括:剔除粗差,例如, GPS 数据跳变,罗经、罗盘和尾标定位数据的削尖和平滑处理等;纠正可能出现的误操作,例如,改正因为误操作而输入的错误的椭球体和投影参数;推算定位网络中部分节点的坐标,例如,输入人工偏移距,通过推算获取没有直接定位的节点坐标;丢炮改正,例如,找出丢炮和漏炮的炮点,通过内插方法,重新求得其坐标;优化定位网络,例如,通过测网平差,重新进行误差分配,改正观测误差,提高测网稳定度,从而实现定位数据优化。

对数据进行预处理主要是通过滤波、内插、外延等手段对数据进行平滑处理。在这里需要处理的数据包括电缆上使用的水鸟罗盘数据、水鸟深度数据、水深数据、DGPS 定位数据、罗经数据和有关尾标定位数据。其中,罗盘数据的处理研究最为关键。

因为使用的定位设备较多,定位数据来自不同定位精度的设备,所以,首先需要对所有的定位数据

进行分组,并确定每组数据的 SD 值和它的比值,这是对定位数据进行的首次处理。比如说 DGPS 的定位精度为 2 m,那么就需要把 20 作为 SD 值输入到 DGPS 组中。在这里需要说明的是对尾标角度的精度控制应该按下列公式计算:

$$\text{精度 } \Phi = A \operatorname{rcsin} \frac{\text{尾标距离 SD}}{\text{调查测得的平均距离}}$$

接着,对每个观测数据进行精细处理。这一步是整个后处理的重点和中心点,数据处理的好坏,将直接影响到网络平差结果和最终处理数据的输出。处理时,首先输入有关的控制参数,包括阈值、数据滤波、数据的外延和内插值等。这些参数都需要根据实际设备精度和调查的有关规范和实际情况确定。

网络平差采用陆地导线测量平差处理的理论和方法,即把船上 DGPS 天线、震源 RGPS 定位标、电缆头部 RGPS 定位标、电缆尾部 RGPS 定位标当作导线上的已知点;船罗经和电缆罗盘测量值作为方位角观测值;DGPS 天线相对距离、电缆偏移距、电缆罗盘间物理长度和电缆弹性段物理长度等作为距离观测值,建立整体平差网,使用最小二乘法对网络进行迭代计算,直至误差小于所给门限值(0.1)。经

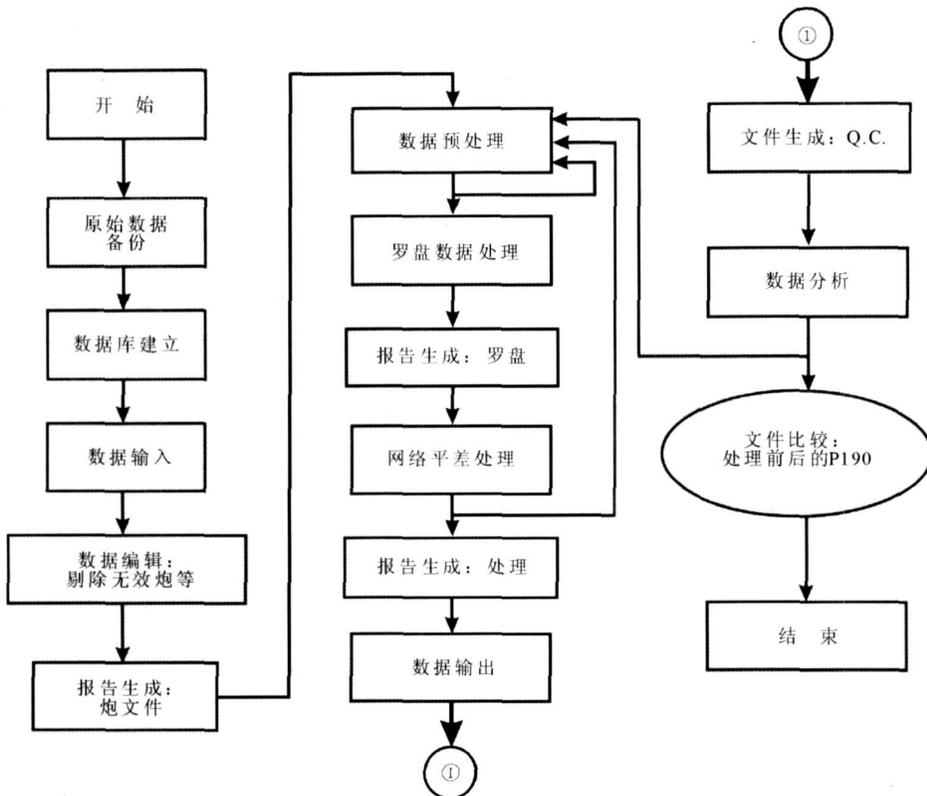


图 5 导航定位数据处理的基本流程

Fig. 5 The flow chart of positioning data processing

过平差后的数据将更加真实、更加准确。当然,并不是每个设备的观测值都可以用于平差计算,对误差过大的观测值,平差时应将其“剔除”。例如,GPS数据包括在用和备用GPS两套(或两套以上)设备,如果在用GPS数据误差过大,处理时将不被使用,而是用质量高的备用GPS数据替代。一般在平差网络建立完成之后,需首先进行网络模拟平差。平差结果有助于查找问题,然后利用相应模块对问题数据重新处理。如果单位权中误差存在跳变,将通过时窗分析,确定跳变误差所在的炮号位置,找出错误观测值,然后再返回预处理模块对该值进行处理。处理完成后,再进行整体平差,直至单位方差曲线没有突跳,平差结果达到要求为止^[6]。

5 网络定位误差

影响网络定位精度的误差源包括GPS接收机定位误差、RGPS系统定位误差、罗经和电缆罗盘误差、电缆物理长度拉伸误差和电缆头标参考点漂移误差等^[9]。

5.1 GPS接收机定位误差

不同型号GPS接收机和不同差分方法产生的实时定位误差各不相同。如SF2050M GPS接收机通过接收StarFire系统提供的差分改正数,实时动态定位精度可达到15 cm; GBX-Pro GPS接收机通过接收Imasat系统或我国信标台提供的差分改正数,一般只能达到3 m左右的实时动态定位精度。

为了检验GPS接收机的工作性能和定位精度的可靠性,通常在每次野外施工前或按一定的时间周期(如3个月)对GPS接收机检测一次。检测时,将GPS接收机放置在一个高等级GPS控制点上,连续观测一定时间,按下式计算其内、外符合误差:

$$\text{内符合误差: } m_B = \pm \sqrt{\frac{\sum (B_i - B)^2}{(n-1)}}$$

$$m_L = \pm \sqrt{\frac{\sum (L_i - L)^2}{(n-1)}}$$

$$\text{外符合误差: } M_B = \pm \sqrt{\frac{\sum (B_i - B_0)^2}{n}}$$

$$M_L = \pm \sqrt{\frac{\sum (L_i - L_0)^2}{n}}$$

式中: m_B 、 m_L 和 M_B 、 M_L 分别为纬度和经度方向的内符合和外符合误差; B_i 、 L_i 为纬度、经度观测值, i

$= 1 \sim n$, n 为观测值总数; B 、 L 为 n 个纬度、经度平均值; B_0 、 L_0 为GPS控制点的已知坐标。

5.2 RGPS系统定位误差

与GPS接收机类似,不同型号的RGPS系统定位误差亦不尽相同。如国外的SEAMAP系统,一般的作业条件下,定位精度达到2 m左右。因此,应根据地震资料采集对定位精度的要求,选择性地使用RGPS系统。

5.3 罗经和电缆罗盘误差

罗经和电缆罗盘误差包括系统误差和偶然误差两类^[4]。系统误差是经过校准改正后的残余误差,偶然误差即实时测量误差。罗经的偶然误差可通过选择高精度的罗经来克服,电缆罗盘的偶然误差则可以通过数据处理得到大部分的改正。由于涌浪影响,海上作业时,电缆罗盘的实时方位角测量值通常都会产生跳变或丢失现象,海况越差,数据跳变或数据丢失越厉害。因此,必须对罗盘原始数据进行精细处理。首先是对罗盘原始数据做内插/外延处理,填充丢失的数据,然后进行“削尖”,剔除粗差,最后根据作业海况,选择合适的平滑、滤波常数,对数据进行平滑滤波。重复此3个步骤,直到所有罗盘数据处理后的误差在可以接受的范围内为止(通常,可接受的误差为 $\pm 0.5^\circ$)。

5.4 电缆物理长度拉伸误差

每段地震电缆都有一个标称的物理长度,在平差处理时被用作距离观测值^[5]。野外作业时,由于海况等客观原因及电缆本身附带的设备数量不同,电缆拉力随时在变化,因此其长度亦随之变化,特别是前导段和尾部弹性段的长度变化更大。为了克服这一误差,方法之一是根据电缆的弹性拉伸系数和电缆拉力,在导航系统中对其进行弹性拉伸改正;方法之二则是将头标安置在电缆前导段后、尾标安置在电缆尾部弹性段后,并在数据处理时进行平差改正。尽管通过这两步改正后仍然会存在剩余误差,但一般已在可接受范围内。

5.5 电缆头标参考点漂移误差

理论上,电缆头标位置应与电缆参考点在水面上的投射点一致。但由于头标是通过拉绳系于电缆参考点上,在实际作业时,两者是不能完全重合的,因此存在电缆头标参考点漂移误差。例如,假设电缆沉放深度(D)为5 m,拉绳长度 L 为6 m,则通过

下式,可求得电缆头标参考点漂移的最大误差 E 为:

$$E = \pm \sqrt{L^2 - D^2} = \pm \sqrt{6^2 - 5^2} = \pm 3.32 \text{ (m)}$$

6 结论

(1)天然气水合物准三维地震调查定位技术以“网络三节点法”为基本原理,形成了“震源中心 RGPS”、“电缆头标 RGPS”和“电缆尾标 RGPS”3 个基本节点,通过罗盘系统对电缆形状的控制,组成了天然气水合物准三维地震调查定位网络的基本配置。

(2)通过对各网络节点的位置计算和误差评估,建立了比较精确的位置点。通过对船罗经和电缆罗盘测量值作为方位角观测值, DGPS 天线相对距离、电缆偏移距、电缆罗盘间物理长度和电缆弹性段物理长度等作为距离观测值,建立整体平差网,形成了比较优化的数据处理方法和流程。

(3)本方法在 2006 年南海水合物资源调查中使用,大幅度提高了定位精度,震源中心节点定位精度由以往的 5 m 左右提高到 1 m 以内;电缆头部定位精度由以往的 10~20 m 提高到 0~2 m;电缆尾部定位精度优于 5 m,进而大大改善了地震资料质量,提高了天然气水合物分布位置的落实,为天然气水合物的获取提供了有力的技术支持。

参考文献(References)

- [1] Cordsen A. Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys[J]. The Leading Edge, 2002, 21(8): 764-770.
- [2] 凌云,吴琳,陈波等.宽/窄方位角勘探实例分析与评价(一)[J].石油地球物理勘探,2005,40(3):305-308,317.[LING Yun, WU Lin, CHEN Bo, et al. Prospecting sample and evaluation of Wide/Narrow-azimuth seismic surveys(I)[J]. Geophysical Exploration for Petroleum, 2005, 40(3): 305-308, 317.]
- [3] 凌云,吴琳,陈波等.宽/窄方位角勘探实例分析与评价(二)[J].石油地球物理勘探,2005,40(4):423-427.[LING Yun, WU Lin, CHEN Bo, et al. Prospecting sample and evaluation of Wide/Narrow-azimuth seismic surveys(II)[J]. Geophysical Exploration for Petroleum, 2005, 40(4): 423-427.]
- [4] Andreas Cordsen. 陆上三维地震勘探的设计与施工[M].石油工业出版社,1996.[Andreas Cordsen. Design and Construction of Land 3D Seismic Surveys[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.]
- [5] 郝钧.三维地震勘探技术[M].北京:石油工业出版社,1992.[HAO Jun. Technology of Land 3D Seismic Surveys[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.]
- [6] 曹占全,杨思勤.多源多缆震源电缆定位传感器配置方法[C]//中国海洋石油“三新、三化”优秀论文集.1999.[CAO Zhan-quan, YANG Si-qin. Deploy methods of positioning sensor of multi-source and multi-cable of seismic source cable[C]//Institute of Geophysical Prospecting of CNOC; Collected Excellent Papers of “Three New & Three Changed” of CNOC. 1999.]

THE NAVIGATION AND POSITIONING TECHNIQUE FOR PSEUDO 3D SEISMIC SURVEY IN NATURAL GAS HYDRATE EXPLORATION

ZHANG Ming, PENG Zhao-xu, SHA Zhi-bin¹

(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: With the exploration of gas hydrate in China going forward to the phase when field test drilling is carried out, the accuracy of navigation and positioning has to be improved to identify gas hydrate more accurately and describe its outer conformation and distribution characteristics more precisely so as to determine where gas hydrate exactly exists. In normal gas hydrate investigation, navigation and positioning accuracy can be greatly improved by means of different methods such as positioning network configuration, error analysis and data post processing based on the particularity of single streamer and single source pseudo-3D seismic survey. These methods have been proved to be of significant effect on practical field seismic data acquisition and will provide effective technical support for the discovery of gas hydrate in China.

Key words: natural gas hydrate; pseudo-3D seismic survey; “three-node positioning network”; navigation and positioning