

南海含天然气水合物地层速度反演方法探讨

张宝金¹ 张光学¹ 耿建华² 徐华宁¹ 成谷³

(1. 广州海洋地质调查局 广州 510760; 2. 同济大学 上海 200092;

3. 中山大学 广州 510275)

摘 要 速度反演在水合物勘探中占有重要位置。本文讨论了精细走时速度分析、全波形速度反演方法和它们的初步试算结果。精细走时速度分析方法对叠前时间偏移数据进行构造化,尽量挖掘了数据的分辨能力;利用谱分析的方法,稳定性好;在空间上提高了分析的密度;自动拾取的速度具有较高的精度;是一种实用的精细速度分析方法。全波形速度反演利用观测数据和模拟数据的残差计算搜索方向并不断修正模型,把模拟数据和观测数据达到最佳拟合的速度模型作为反演结果,具有更高的分辨能力。文中探讨了两种方法在我国南海含水合物地层勘探中应用的可能性。

关键词 速度反演 水合物 高密度速度分析 全波形反演 反射地震

1 前 言

2007年5月在我国南海实施的水合物钻探证实我国南海存在天然气水合物矿藏。测井结果显示含水合物地层速度较围岩速度高很多。说明速度异常是众多水合物地层地球物理异常中最典型和重要的异常,是水合物地层最重要的判别标志之一。以往众多的研究也表明水合物的赋存与层速度的显著升高呈高度的正相关。速度异常还是多参数联合研究的必要参数,同时高质量的速度也可作为其他异常研究的基础参数,比如AVO分析、无井约束反演等参数提取均可利用高精度的地震波速度作为重要参数。这些都说明含水合物地层的速度反演是水合物勘查中地震数据分析的重要内容。

进行含水合物地层的速度反演主要从地震波的走时分析和叠前波形反演两方面入手^[1,2]。利用走时的速度分析方法,可以反演尺度稍大的地层^[3],同时为叠前波形反演^[4]提供基础参数。而利用波形反演(特别是叠前全波形反演)则可以反演更小尺度的速度结构。

进行速度反演面临众多的难题和挑战。从数学本质上讲,解反问题相当于微分运算,相对于求正问题的积分运算来说,其稳定性要差很多。要做好水合物地层的速度反演工作,首先要正确面对非线性、不确定和多解性等理论层面的本质定性,需要有对反演方法的深刻理解;其次要作大量细致和有成效的工作,有对实际问题的深入认识和应对策略。

国家重点基础研究发展计划(973)资助(2009CB219505);国家高技术研究发展计划(863)资助(2006AA09A202)。

第一作者简介:张宝金,男,1973年生,理学博士,高级工程师,主要从事地震资料处理,波动理论正反演研究。E-mail地址:zhangbaojinchg@163.com。

本文从高密度精细走时速度分析和叠前全波形速度反演两个角度,略述了两种方法在我国南海天然气水合物地层的应用前景。

2 精细走时速度分析

常规速度分析属于框架速度分析,这种速度分析一般空间密度低、精细度不高。而精细的速度分析则缺少有效的技术方法支撑。在研究了目前几种典型的速度分析方法之后,提出的进行含水合物地层高密度、高精度速度分析的具体方案^[5],具有稳定性好、实用性强的特点。

2.1 方法

进行高分辨率速度反演的具体方案为:

1. 首先进行保真处理得到纯净的地震波数据,然后进行叠前时间偏移处理,使绕射波收敛、构造归位;
2. 接着把地震数据进行构造化(界面化),主要目的是挑选出主要的层位,而靠得很近的波形和非主要层位在构造化的过程中被排除,同时有效提高数据的分辨能力;
3. 计算高密度的速度谱,保证其在空间和时间上具有相当高的密度;
4. 进行基于构造界面的速度谱自动分析,并进行速度整理,得到高密度、高分辨的均方根速度场;
5. 利用构造化的数据进行层速度计算,得到空间分辨率和时间分辨率都较高的层速度。

该方案的设计主要针对如下几个矛盾:

1. 时间域速度分析还是深度域速度分析

深度域速度分析方法结合深度域成像方法可直接得到层速度,在理论上更加完美,但因其深度域分析速度,速度和深度耦合造成速度测不准。时间域速度分析的基本条件是地震波数据在时间域可成像,且成像精度可满足要求。在速度横向变化不是很剧烈时,时间域叠前成像是适用的。在时间域的速度分析稳定性和实用性更高,通常首先得到均方根速度,然后利用 DIX 公式结合层位信息把均方根速度转换为时间域的层速度。

2. 谱分析还是反演求解

反演求解的方法需要拾取地震反射界面,这增加了应用的复杂性。而且在计算大型稀疏方程组等方面的不稳定性,使其在实用性方面大打折扣。而谱分析方法抗噪能力强,计算稳定,直观简单,可控性好。

3. 利用原始数据还是叠前时间偏移结果

实践证明绕射波的速度分析结果偏高,利用保幅叠前时间偏移使绕射波收敛、构造归位。不能简单利用未偏移的数据进行层速度反演。

4. 如何提高速度谱的分辨率

传统的速度谱能量团大,其无论时间分辨率还是速度的分辨率都很低。研究地震数据构造化的方法,挑选出主要的层位,而靠得很近的波形和非主要层位在构造化的过程中被排除。构造化后的地震数据,仅剩余一些细分的界面,可反映微地震层序,这样数据的分辨能力得到有效提高。利用构造化后的数据计算速度谱,可得到分辨率很高的谱。

5. 速度分析点的密度

进行高密度的速度分析(每个 CDP 点都进行速度分析),可得到空间上细致的速度分布状态。

6. 速度的拾取精度

利用自动拾取的方法,避免人为拾取带来的误差。结合高密度速度谱,达到精细速度分析的目的。

7. 层速度误差的主要来源

层速度的误差来源主要来自层位误差和均方根速度误差,也即速度谱拾取点的坐标位置(T, V)。严格控制误差,有必要进行沿构造层的层位时间和速度的统计和分析。

采用叠前时间偏移后的道集数据,利用尖脉冲替代波形使数据界面化,计算高密度速度谱并自动拾取,得到了高密度的时间域均方根速度和层速度。该方法与深度域速度分析方法相比,避免了速度与深度的耦合,实用性较高。且在时间上尽量挖掘了数据的分辨能力,在空间上提高了分析的密度,自动拾取的速度具有较高的精度,是一种实用的高精度精细速度分析方法。

2.2 试算

选用我国南海某地震测线进行方法初步测试。我国南海含水合物地层处于陆坡区,海水相对较深,地势多不平坦,这给地震速度反演造成一定困难。该数据存在较强涌浪噪声,首先进行保真去噪处理,以保证下一步处理的数据质量。每个 CDP 的每个时间样点均计算速度谱,从而形成高密度速度谱,速度的扫描间隔缩小到 1 米/秒。扫描后自动判别并拾取,得到高密度、高精度的速度拾取点。利用 RMS 速度和对应的时间转换的层速度(平滑后的结果)见图 1。大体上该速度与构造形态吻合,BSR 下速度变低的现象可识别。

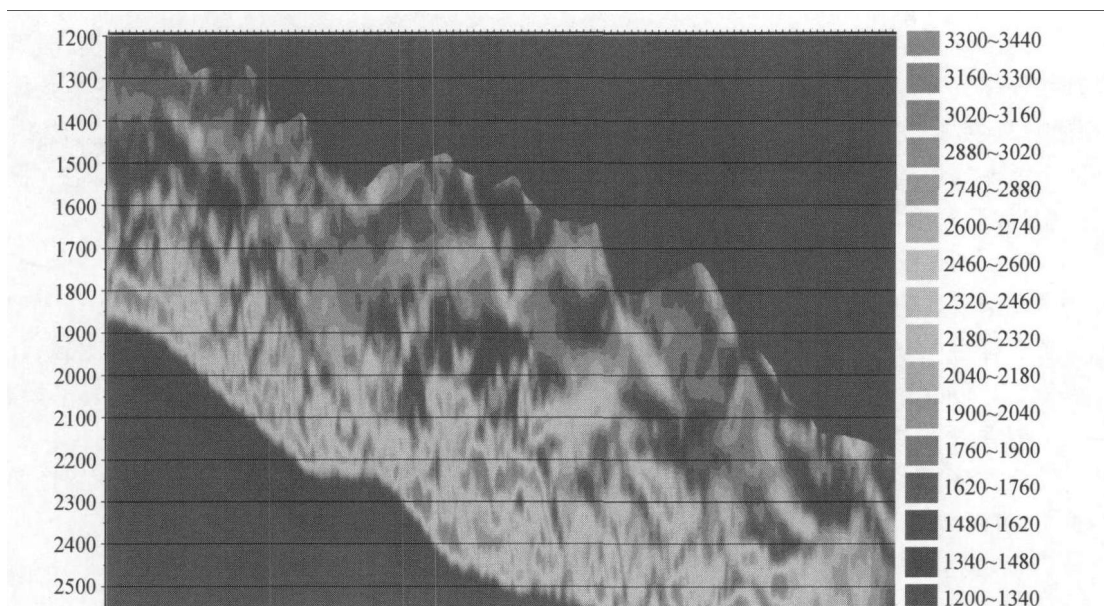


图 1 由高密度均方根速度转换的层速度平滑后的结果

Fig. 1 The smoothed interval velocity converted from the dense RMS velocity

3 叠前全波形速度反演

常规速度分析方法随着地层厚度的减小,误差放大非常严重,以至于对相对薄层的常规速度分析结果不可用。而分析相对薄的地层速度,叠前全波形反演则存在相当大的优势,全波形叠前反演方法试图最大限度地利用叠前地震数据的信息,从中提取岩石的弹性参数(包括纵、横波速度和密度),精度和分辨率都要远远高于常规速度分析方法。对于厚度在20米左右的含水合物地层,利用基于走时速度分析方法进行如此之薄的地层速度分析存在相当大的难度,在这种条件下叠前全波形反演可能是进行地震波速度研究的有力工具。本文作者对一维层状介质叠前全波形弹性参数非线性迭代拟合反演方法进行了系统的研究。

3.1 方法

该反演方法属于拟合反演方法,就是把模拟数据和观测数据与达到最佳拟合的速度模型作为反演结果。属于非现性方法的一种,利用观测数据和模拟数据的残差计算搜索方向并不断修正模型。包括如下几个关键问题:

1. 目标函数构造

引入参数和观测数据的先验概率信息,以观测数据和模拟数据残差的加权能量为目标函数。反演计算目标就是获得使该目标函数极小的弹性参数。

2. 正演模拟

以获得观测数据和模拟数据的残差。利用传播矩阵法^[6]进行正演计算,精度高、速度快、适应分频模拟和衰减介质等情况。

3. 灵敏度分析

当速度参数存在一个扰动的时候,观测数据对应会发生变化,这种相对的变化就是观测数据对参数的灵敏度。它是计算速度搜索方向的基础。从灵敏度可以观察到要解决问题的难易程度,这和反问题的适定性密切相关。从弹性波动方程出发,利用 Born 近似可以得到数据对参数的灵敏度,其本质就是把速度参数的扰动表示成震源扰动。最后的灵敏度用格林函数及其对深度的导数表达^[7]。这样灵敏度的计算有可归结为格林函数的计算(正演问题)。

4. 搜索方向的确定

利用灵敏度矩阵和观测数据与模拟数据的残差构造一个线性问题,解这个线性问题就可以获得一个线性搜索方向(梯度方向)。求线性问题的解涉及求逆的过程,但利用求逆运算的伴随运算比较稳定,相当于该线性问题最小二乘解法的单步运算。在获得梯度方向后,可以形成共轭梯度方向^[8]。利用共轭梯度法解该问题是一个非线性过程,隐含了分步的线性过程。

5. 搜索步长的确定

利用尝试的方法,确定搜索步长(比如二分法)。

6. 反演的过程监控

共轭方向法的单步运算是很稳定的,相当于对参数的扰动进行成像。在计算目标函数对参数的梯度的时候,把梯度分配到对应的慢度上形成负梯度面板,相当于对扰动参数进行叠前平面波成像。该面板可以使反演的中间结果有明确的、有意义的显示,对监控反演的过

程、指导反演并采取相应的策略有重要的意义。把参数的扰动源替换为各种不同的反射系数,可以对相应的反射系数成像。由于格林函数的计算是精确的,而且真正按照 $W^{-1}RW^{+}$ 模型成像,所以成像具有振幅保真的特征。反射系数成像对低频参数背景的分析很有意义。虽然波形反演的单步运算是稳定的,但整个迭代过程并不一定稳定。根据梯度面板调整反演的参数(深度、频带等),从而实现对反演的过程监控,可以提高反演的稳定性。反演过程要先保证浅层的反演质量,通常可以先反演较低频的成分。根据梯度面板可以判断反演过程的演化质量,据此进行适当的调整,从而在一定程度上避免了反演结果可靠性差的问题。

3.2 试算

模型(图2)是一个测试模型,本文的数据是从 Kormendi(1991)发表的论文上重新数字化获得的,本文后面的弹性参数反演的模型测试也采用了该模型。正演结果(图3)显示了丰富的波型,包括具有 AVO 效应的反射波、多次波、折射波、转换波、直达波等等。

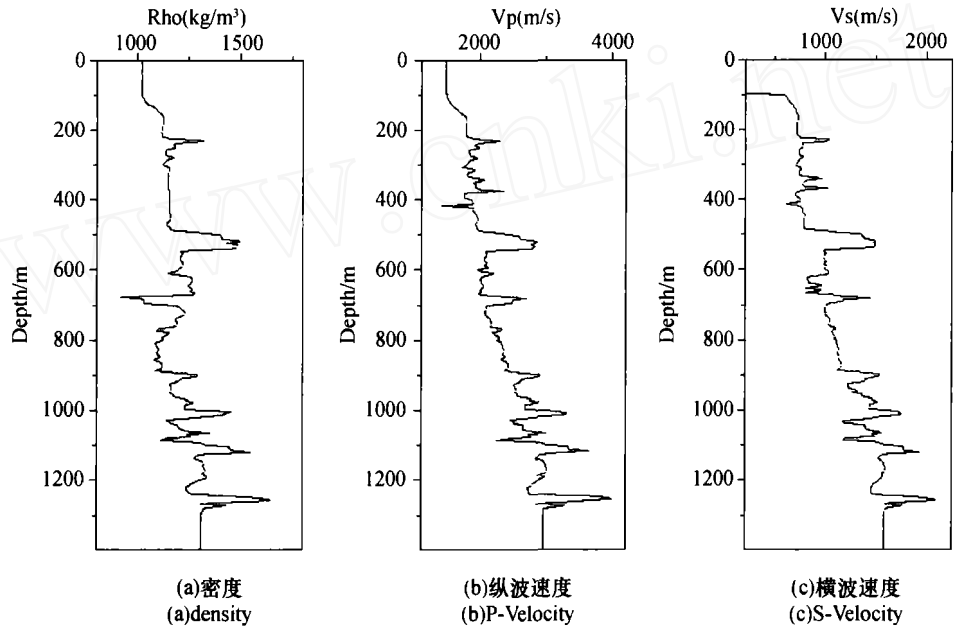


图2 由海上测井曲线得到的弹性参数模型
Fig. 2 The elastic parameter model obtained from the log

假设横波速度和密度已知,进行了纵波速度的反演,反演结果见图4(a),反演前和反演后的数据及其误差见图4(b)。在反演过程中,采用了先反演浅部和低频数据的措施,从结果可以看到反演的效果是相当好的,大部分的数据误差都得到了收敛。

4 速度反演方法应用前景的讨论

我国南海可能含水合物地层的地层时代较新,埋深浅(相对于海底),岩性较单一,采集的地震数据频带宽、信噪比相对较高,这些是进行地震速度反演的有利条件。

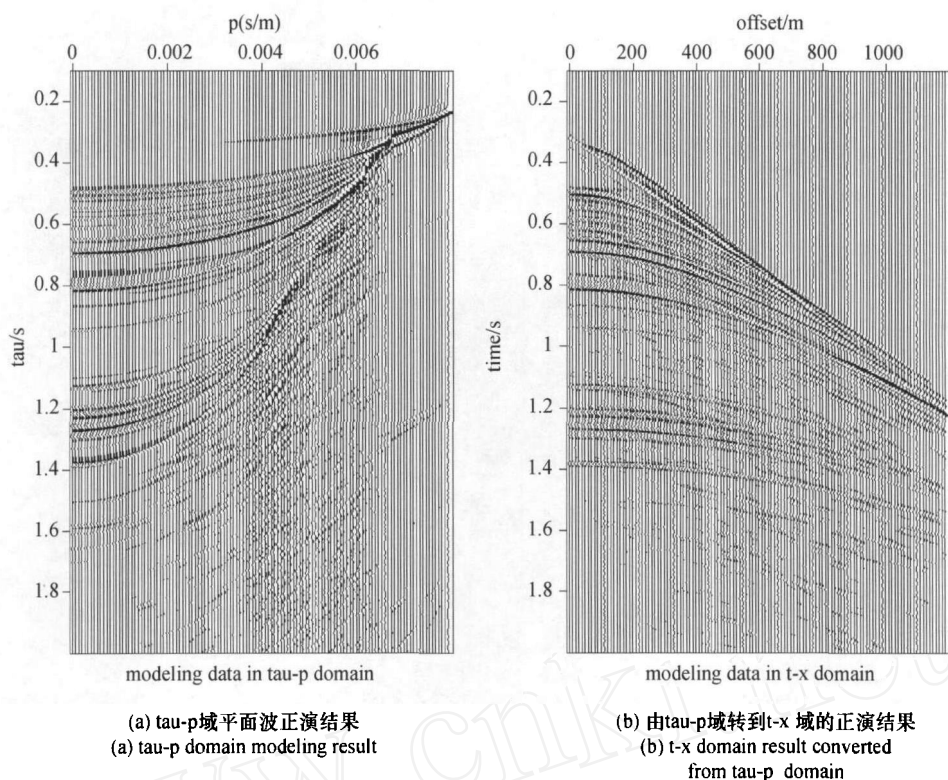


图3 对应图1的P波正演结果(结果包含多次波、转换波、AVO效应)

Fig. 3 The modeling result corresponding to Fig 1 (contains multiple, converted wave, AVO effects)

高密度精细走时速度分析是框架速度分析的有力补充。精细走时速度分析思路充分挖掘了地震数据的潜力,提高了时间方向的分辨能力、提高了空间方向的分析密度,注重实用性,同时克服了层析成像等狭义反演方法不稳定的缺点、提高了速度分析的精度。对具体的数据而言,若在空间方向上速度场比较稳定,则应该承认该速度分析方法是稳定的。作者认为该方法是高精度的精细速度分析方法,可为进一步的波形反演打下坚实的基础。

全波形速度反演是走时速度反演的进一步补充。Singh 在 1993 年利用叠前全波形反演方法揭示温哥华岸外 BSR 之下存在 30 米厚的低速游离气带^[9],发表在美国《科学》杂志上,曾经引起了不小的反响,说明该方法有良好的前景。在国内,宋海斌^[2]、张宝金^[4]等进行了理论方法上的一些尝试,宋海斌在 2002 年进行了单点的应用尝试。该方法属于定量的波动方程叠前全波形参数反演(岩性成像)技术,由于该技术理论难度较大,应用条件要求较高,目前尚不能在生产上推广。另外该技术的应用目前还存在一些不成熟的因素,但作为一项很有价值的关键技术,已经引起了广泛的重视,在国外已经有了一些应用的例子。

另外,我国南海北部陆坡水合物钻探的地区具有水深、倾角陡、地层起伏较大等特点,在地震采集时受海流影响,电缆羽角较大。在这种情况下,无论是常规的速度分析还是叠前全波形反演都会面临着地震理论模型与实际情况存在较大差距的问题,给速度反演带来非常大的影响。特别是对叠前全波形反演,如果不对数据进行较好的改正或校正,取得反演的成功几乎是不可能的。所以应用的过程首先面临的的就是针对数据的合理的改正和校正研究,这些都需要细致的应用研究来解决。对于不符合模型的情形,只能绕过,这属于系统误差,

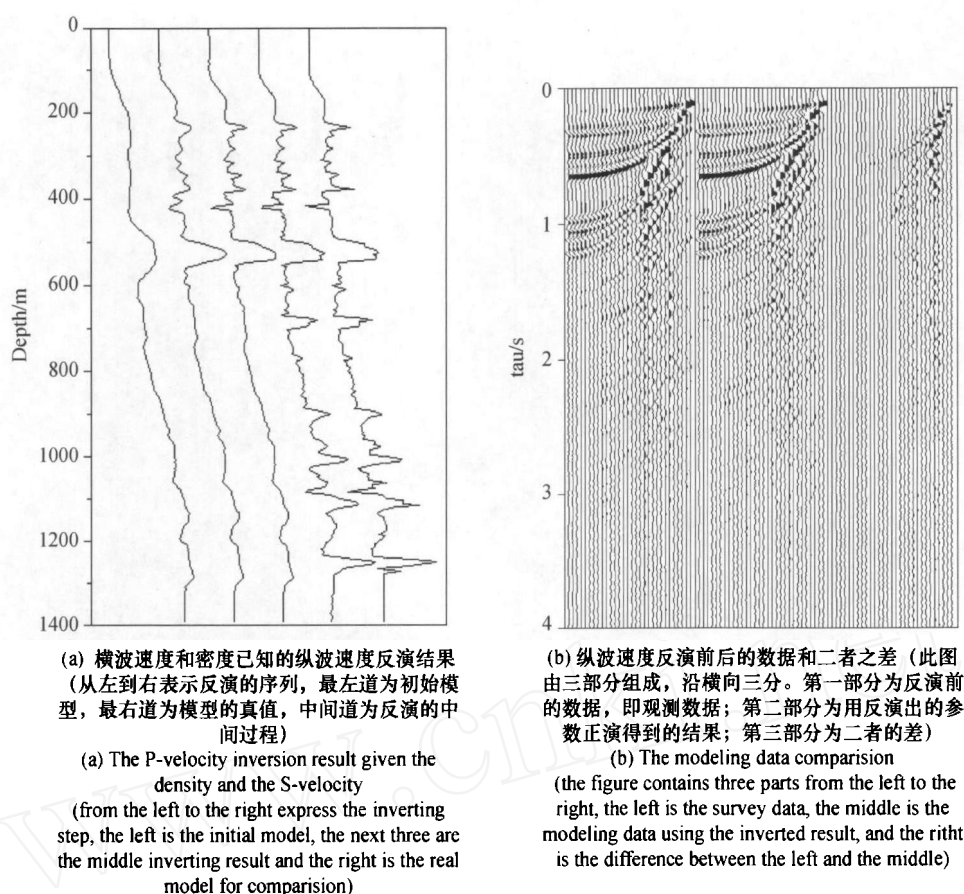


图 4 横波速度和密度已知的纵波速度反演

Fig . 4 The P-velocity inversion given the density and the S-velocity

进行系统误差改正即可。

应特别指出的是,速度反演受到各种条件的限制和影响,为了获得较可靠的速度反演结果,要注意速度反演的各种使用条件并采取适当的校正措施。比如在绕射波比较发育的地方,如果不进行叠前成像处理,层速度的反演会有很大的误差,凡是存在绕射的地方,叠加速度均偏高^[5]。这说明好的方法要在满足其使用条件的基础上才能得到好的结果。

理论研究和应用研究相结合,该技术就会逐步得到推广。鉴于我国目前已经钻探取得了水合物地层的第一手资料,加强这些资料的利用和消化,适时地推动全波形反演应用研究很有必要。

参 考 文 献

- [1] 马在田,宋海斌,孙建国. 海洋天然气水合物的地球物理探测高新技术. 地球物理学进展,2000,15(3),1~6
- [2] 宋海斌,松林修,杨胜雄,江为为. 海洋天然气水合物的地球物理研究(II):地震方法. 地球物理学进展,2001,16(3),110~118
- [3] 成谷. 反射地震层析成像方法研究. 同济大学博士学位论文,2004
- [4] 张宝金. 地震波参数反演及其可信度分析. 同济大学博士学位论文,2003

- [5] 张宝金等. 地震波参数反演及其在南海北部典型测线的应用研究. 内部报告, 2006
- [6] Kennett N. Seismic Wave Propagation in stratified media, Cambridge university press, 1983
- [7] Dietrich M, et al. Perturbation of the screen – wave reflectivity of a depth – dependent elastic medium by weak inhomogeneities; Geophys. J. Int. , 100, 1990
- [8] Kormendi F, et al. Nonlinear waveform inversion of screen – wave seismograms in stratified elastic media; Geophysics, 56(5), 1991
- [9] Singh S, et al. Velocity Structure of a Gas Hydrate Reflector; Science, 260 ,1993

Discuss on the Methods of Velocity Inversion of the Stratum Containing Gas Hydrates in South China Sea

Zhang Baojin¹ Zhang Guangxue¹ Geng Jianhua² Xu Huaning¹ Cheng Gu³

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, 510760;

2. Tongji University, Shanghai 200092; SUN-YISAN University, Guangzhou, 510275)

Abstract: Velocity inversion is an important aspect of gas-hydrate exploration. A travel time fine velocity analysis method, a full waveform velocity inversion method and their elementary results are discussed. The fine velocity analysis method based on travel time is a practical method, for it can improve the resolution ability of the data by making the data after pre-stack time migration become tectonic surface, has good stability by using spectrum analysis method, has enough analysis density, has high accuracy by automatic picking. The result of the full waveform inversion, which calculates the searching direction and modifies the parameter model by fitting the survey data and the modeling data best, has better resolution for it is based on the waveform. Their application possibility is discussed to find the gas hydrate in the South China Sea.

Key words: Velocity inversion Gas hydrate Dense velocity analysis Full waveform inversion Reflect seismic