

起伏地表物理模拟的水面无接触快速采集方法

刘洋^{①②④} 李向阳^{*①②③} 魏建新^{①②}

(^①中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; ^②中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室,北京 102249; ^③英国地质调查局,Edinburgh, UK; ^④西安石油大学地球科学与工程学院,陕西西安 710065)

刘洋,李向阳,魏建新. 起伏地表物理模拟的水面无接触快速采集方法. 石油地球物理勘探,2015,50(3):483-489.

摘要 由于实验室条件的限制,针对起伏地表的物理模拟采集直接在固体表面进行,存在实现难度大、采集速度慢、耦合误差大的缺点。为此,本文基于波场重构原理,提出了一种针对起伏地表的水面无接触快速采集方法,通过直接在水面进行观测、采集,然后由水面观测的地震数据重构固体表面的观测地震数据。该方法将数值模拟和物理模拟结合,既保留了物理模拟的真实性,又利用了数值模拟的易操作性,能够克服起伏地表物理模拟采集难度大、采集速度慢的问题,大大提高了起伏地表物理模拟采集的精度和效率。论文实验部分对数值模型和物理模型分别进行固体观测和水面观测,通过对两种采集方法得到的固体观测地震记录进行比较,证明了该方法的优越性。

关键词 起伏地表 有限差分 物理模拟 波场重构

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.03.014

1 引言

如今中国各重点油气区几乎都涉及起伏地表地形,例如柴达木盆地的东柴山、四川盆地的川东北地区 and 塔里木盆地的库车山地等。在起伏地表区域,地形起伏剧烈,基岩直接裸露地表,且表层结构和岩性复杂,这给油气勘探带来了诸多困难,如起伏地表地形产生的散射和地滚波会直接影响直达波与反射波的能量、波形、振幅、频谱等参数,从而对地震记录造成污染,并且无法通过常规的处理流程消除,最终影响地下构造的成像精度。因此如何消除起伏地表地形对地震采集的影响具有重要意义。

前人针对起伏地表地形开展了静校正、数值模拟中网格剖分产生的阶梯状自由界面的处理以及观测系统设计等研究^[1,2],而进行上述研究首先需要一套完整的模型数据,用以检验并验证方法的正确性。一般说来,获得模型数据主要有数值模拟和物

理模拟两种途径。与数值模拟相比,物理模拟能获得更加真实的复杂波场特征。然而,在起伏地表物理模拟中,呈起伏状的物理模型表面各点高程不尽相同,难以统一消除上覆水层的影响。在实验室开展起伏地表物理模拟时,换能器通常直接安装在起伏地表曲面上,这对换能器和测距仪器提出了更高的要求。为此,赵群^[3]设计了一种小型换能器,该换能器体积小、性能高。魏建新等^[4]设计了点接触换能器,并通过在单层平板上进行测试,了解了不同的换能器在能量、波形的振动周期(带宽)等方面的优劣。从上述研究中能够看出,换能器在设计上存在难以调和的矛盾:小接触面的换能器与起伏表面耦合度好,但是相应的发射能量弱,地震记录的信噪比低;为了提高信噪比,需要扩大模型尺寸,而此时震源波场的穿透力又无法保证。此外,在起伏地表的物理模拟过程中需要进行测距,也增大了物理模拟的实现难度^[3]。

综上所述,如今针对起伏地表物理模拟的数据

*北京市昌平区中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室,102249。Email: xyl1962@hotmail.com

本文于2014年6月16日收到,最终修改于2015年3月17日收到。

本研究受国家自然科学基金联合基金重点项目(U1262208)和国家科技重大专项“克深山地物理模型制作与采集”项目(2011ZX05046-01)联合资助。

采集仍然存在两个难题:①耦合误差大,如在采集过程中采用固体模型和换能器的硬接触模式,不可避免地产生耦合误差,从而降低了地震记录的信噪比;②采集难度大、采集速度慢,如高程测量、换能器移动等过程需要人工参与,降低了采集速度。据统计,固体采集需要的时间是水面采集的 120 倍。到目前为止,在固体上直接激发采集仍停留在小型单炮测试和简单模型的研究阶段。

波场重构能够有效缓解地震数据缺失和不均匀性,并被成功用于降低空间采样限制、清除观测痕迹、减少虚假成像等领域^[5,6]。受此启发,本文基于波场重构原理,提出了一种针对起伏地表的水面无接触快速采集方法,通过直接在水面上进行观测、采集,然后由水面观测的地震数据重构固体表面的观测地震数据。该方法将数值模拟和物理模拟相结合,既保留了物理模拟的真实性,又利用了数值模拟的易操作性,能够克服起伏地表物理模拟采集难度

大、采集速度慢的问题,大大提高了起伏地表物理模拟采集的精度和效率。

2 方法介绍

2.1 起伏地表物理模型实验室采集方法

在物理模拟实验过程中,用超声波等方法以激发换能器为媒介模拟震源激发,用接收换能器接收地震波场,从而模拟野外实际地震勘探过程。图 1 展示了针对起伏地表物理模拟中的固体采集方法和本文提出的水面无接触采集方法。为了描述方便,如无特别说明,下文中这两种方法分别用固体采集和水面采集表示。从图 1 可见,水面采集方法直接在模型的上覆水层表面进行采集,避免了换能器与模型表面直接的硬接触模式,有效地解决了耦合误差问题(图 1b)。另外,水面采集免去了高程测量和换能器上、下移动的时间,采集一条二维测线数据的

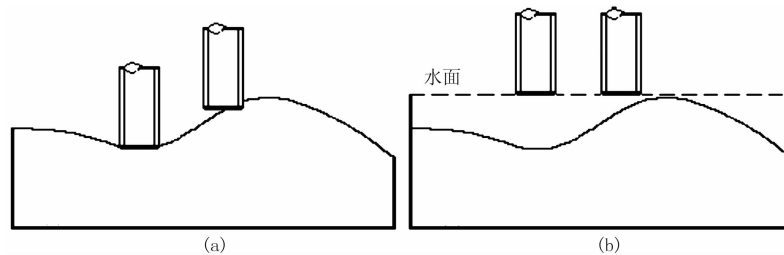


图 1 起伏地表物理模拟采集示意图

(a) 固体采集; (b) 水面无接触采集

时间从(固体采集的)两周缩减为半天。

2.2 波场重构方法

物理模拟以采集纵波数据为主,二维声波方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + f \quad (1)$$

式中: $p(x, z)$ 为空间各点的波场,其中 x 和 z 分别为水平和垂直空间位置; t 为时间; v 为速度; f 为震源。

本文基于叠前逆时偏移有限差分波场延拓理论进行波场重构^[7,8],波动方程波场延拓可以分为正向延拓和反向延拓,其中正向延拓是地震波数值正演,反向延拓是波场逆向传播。正向延拓的有限差分计算表达式为

$$2a_0 p_{0,0}^0 + \sum_{m=1}^N a_m (p_{-m,0}^0 + p_{m,0}^0 + p_{0,-m}^0 + p_{0,m}^0) \approx \frac{h^2}{v^2 \tau^2} (-2p_{0,0}^0 + p_{0,0}^{-1} + p_{0,0}^1) + f \quad (2)$$

上式的显示表达式为

$$p_{0,0}^1 = 2p_{0,0}^0 - p_{0,0}^{-1} + \frac{v^2 \tau^2}{h^2} \left[2a_0 p_{0,0}^0 + \sum_{m=1}^N a_m (p_{-m,0}^0 + p_{m,0}^0 + p_{0,-m}^0 + p_{0,m}^0) \right] + f \quad (3)$$

式中: τ 为时间采样间隔; h 为空间采样间隔。

在式(3)中,时间是 2 阶精度,空间是任意偶阶精度^[9,10],其中精度系数 a_m 可由下式求出

$$a_m = \frac{(-1)^{m+1}}{2m} \times \frac{\prod_{i=1, i \neq m}^N i^2}{\prod_{i=1}^{m-1} (m^2 - i^2) \prod_{i=m+1}^N (i^2 - m^2)} \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

逆时偏移中的波场反向延拓过程实际上就是已知后一时刻的波场值求前一时刻的波场值的过程,具体计算方法与正向延拓类似,其有限差分计算表达式为

$$p_{0,0}^{-1} = 2p_{0,0}^0 - p_{0,0}^1 + \frac{v^2 \tau^2}{h^2} \left[2a_0 p_{0,0}^0 + \sum_{m=1}^N a_m (p_{-m,0}^0 + p_{m,0}^0 + p_{0,-m}^0 + p_{0,m}^0) \right] \quad (5)$$

具体延拓过程是:假设 T 为接收点记录的最大记录时间,以 $t=T$ 时刻波场值为初始值,向时间减小的方向外推,以一个时间步长 τ 为间隔,逐层计算 $t-\tau$ 上的各点处的波场值,直至计算出 $t=0$ 时刻各点的波场值。逆时传播取的是 $t \leq T$ 时地下各点的波场值 $U(x, z)$ 。

假设已知地表各接收点记录的地震记录为 $p(x, z=0, t)$,当 $t > T$ 时, $p(x, z, t) = 0$ 。在反向延拓过程中 $p(x, z=0, t)$ 作为二次波场存在,因而波场的逆时传播可以表示为以下边值问题

$$\begin{cases} p(x, z) = 0 & t > T \\ p(x, z) |_{z=0} = p(x, z=0, t) & t \leq T \end{cases} \quad (6)$$

在满足式(6)边值条件下,正传和反传的波场值具有相关性。鉴于这种假设条件,可以用反向延拓得到的波场近似代替正向传播的波场。基于上述波场延拓理论,对水面激发、水面接收的地震数据经过

两次数值上的延拓处理后,可重构出固体激发、固体接收的波场。图 2 为波场重构流程图,重构过程主要包括一次共炮点道集的延拓、炮检互换及一次共检波点道集的延拓。其中:图 2a 为通过水面采集得到水面激发、水面接收的地震记录;图 2b 为共炮点道集延拓,将检波点延拓到起伏地表上,该过程中的二次震源为线震源,得到水面激发、水面接收的地震记录,目的是重构出水面激发、固体接收的地震数据;图 2c 为所得到的水面激发、固体接收的地震记录;图 2d 为炮、检互换过程,目的是将水面激发、固体接收的地震数据转换成固体激发、水面接收的地震数据;图 2e 为共检波点道集的延拓,将炮点也延拓到起伏地表上,这个过程二次震源也为线震源,得到固体激发、水面接收的地震记录,目的是重构出固体激发、固体接收的地震记录;图 2f 为所得到的固体激发、固体接收的地震记录。亦即是,根据水面观测得到的地震数据,采用上述方法能够重构出起伏地表物理模拟中最难得到的固体激发、固体接收的地震数据(后文中简称为“拟固体观测地震数据”)。

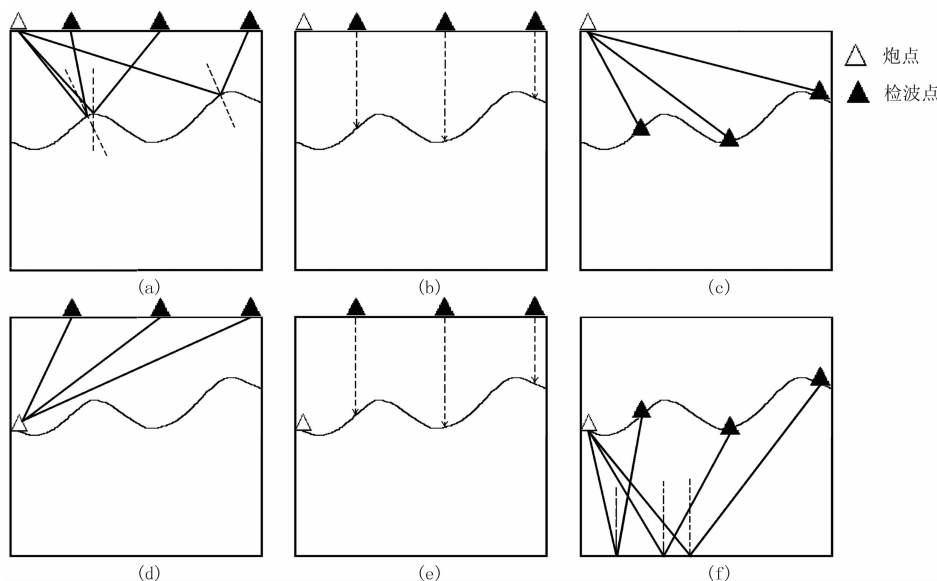


图 2 波场重构流程图

(a)水面激发、水面接收;(b)共炮点道集延拓;(c)水面激发、固体接收;(d)炮、检互换;
(e)共检波点道集的延拓;(f)固体激发、固体接收

3 数学方法验证

为了从数学模型的角度证明水平模型情况下延拓波场能近似代替正演波场,设计了层状模型

(图 3),模型网格数为 101×101 ,其在 $z=67$ 网格处存在一个反射界面,上、下两层对应的速度分别为 1800,2000m/s。空间采样间隔为 3m,时间采样间隔为 0.0001s,震源为雷克子波,位置如图 3 所示。空间导数采用 10 阶精度,时间导数采用 2 阶精度。

图 4 为除去人工边界以后的固体观测波场快照(图 4a)和拟固体观测波场快照(图 4b),由图可见,延拓波场(图 4b)和正演波场(图 4a)相似,表明延拓波场在一定程度上可以近似代替正演波场。

4 实测数据实验

4.1 实验条件

本实验采用中国石油大学(北京)物探重点实验室提供的塔里木盆地库车凹陷山地物理模型(图 5a),该模型为一个典型的起伏地表区域模型,东西宽为

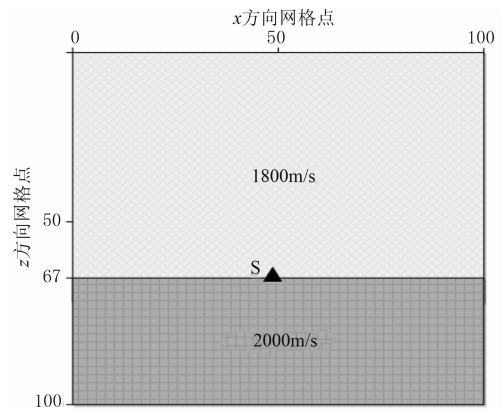


图 3 水平地表模型

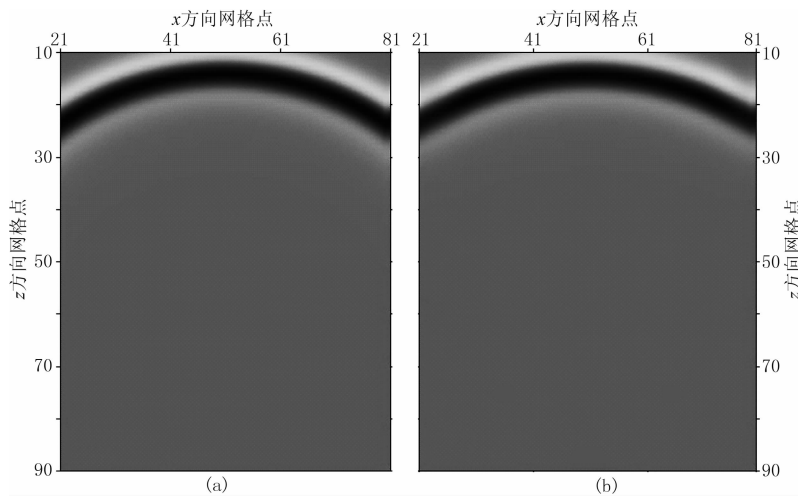


图 4 $t=0.105s$ 时刻的波场快照
(a)数值正演结果;(b)波场重构结果

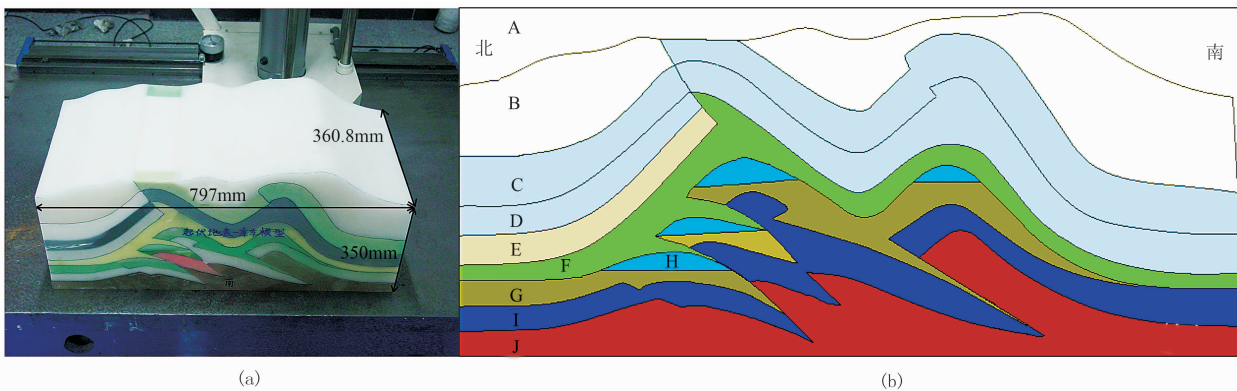


图 5 塔里木盆地库车凹陷物理模型(a)及测线剖面图(b)

物理模型是按 1 : 20000 的比例制成的,时间比为 1 : 10000,采样率比为 1 : 10000,频率比为 10000 : 1

360.8mm,南北长为 797mm,高为 350mm。实验室模型构造走向为东西向,实验测线垂直于构造走向,图 5b 显示了测线正下方的模型剖面。模型中各层的设计速度和实测速度见表 1。针对此物理模型,分别进行了水面观测和固体观测。

在实验过程中,水面观测和固体观测采用的激发换能器均为纵波震源,直径为 3mm,接收换能器均为纵波换能器,直径为 5mm,频率为 225kHz。在水面观测中,发射仪器电压为 300V,脉宽为 0.5MHz/VAR 4,接收放大器设在 60dB 档;在固体观

表 1 塔里木盆地库车凹陷物理模型各层的速度值

层序号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
设计速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2600	2475	2250	2100	2000	1800	2400	2300	1600	1500
实测速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2716	2562	2277	2059	2016	1875	2456	2375	1674	1500

测中,发射仪器电压为200V,脉宽为0.5MHz/VAR 4,接收放大器设在 40dB 档。

4.2 物理模型的数值验证

用实验模型的速度数据对波场重构方法进行了数值验证,数值模拟中空间采样间隔为 20m,时间采样间隔为 0.002s,时间采用 2 阶精度,空间采用 8 阶精度。

图 6 显示了在模型测线上距离北边沿 252mm

处设置震源,用两种采集方法得到的单炮地震记录的对比。由图中可见,除了靠近边界的部分有少许翘起外,拟固体观测的单炮地震记录(图 6b)清晰地反映了固体观测单炮地震记录(图 6a)的地下构造面貌。这说明针对复杂的起伏地表模型,拟固体观测地震数据的精度仍然较高,由水面观测数据重构出固体观测数据的方法依然可行,也证明了本文针对简单起伏地表物理模拟所提出的快速采集方法

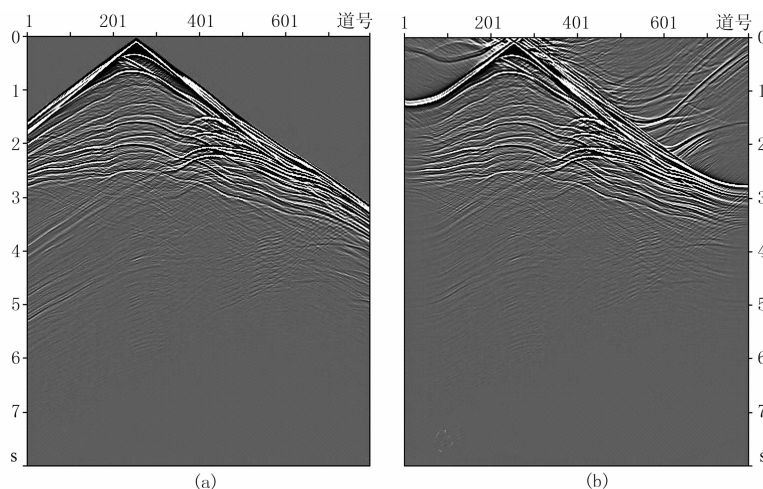


图 6 固体激发、固体接收(a)与拟固体激发、固体接收单炮地震记录(b)对比

的有效性。

4.3 实际资料验证

水面采集观测系统参数为:最小炮检距为 16mm,最大炮检距为 334mm,炮间距为 4mm,道间距为 2mm,覆盖次数为 40×2 。对应的采集参数为:共 160 炮,160 道接收,共 4096 个采样点,采样间隔为 $0.2 \mu\text{s}$ 。自北向南(小桩号放炮)和自南向北(大桩号放炮)各测一次,第一炮点所在位置分别为模型北边沿和距模型北边沿 800mm 处。在本组实验中,水面采集均在上覆水层厚度为 4mm 的条件下进行。

固体采集观测系统参数为:炮点位置分别为距模型北边沿 76,140,252,332,380,412,508mm 处,最小炮检距为 20mm,最大炮检距为 338mm,道间距为 2mm。对应的采集参数为:160 道接收,共 4096 个采样点,采样间隔为 $0.2 \mu\text{s}$ 。

分析采集结果可知,固体采集和水面采集的信号能量相差近两个数量级(最大值分别为 0.157389 和 11.793290),说明水面采集方法克服了固体采集中能量不足问题。

将水面观测的地震记录进行重构,得到了拟固体观测地震记录,并与固体观测中距北边沿 252,412,508mm 处激发点的地震记录进行了对比、分析。这三个点分别代表相对平点、相对凹点和相对凸点,图 7~图 9 分别为这三个点的单炮地震记录对比,道间距均为 40m。由图中可见:①拟固体观测地震记录(图 7b、图 8b、图 9b)反映了水面观测地震记录的面貌(图 7c、图 8c、图 9c 中的绿色箭头所示),说明经过波场重构后,地震有效信号得到了完整保留;②在相对平点处放炮,重构后地震信号除了时间位置发生变化,形状改变并不大,这是由于相邻检波点静校正量间差异不大所致(图 7b);③在相对

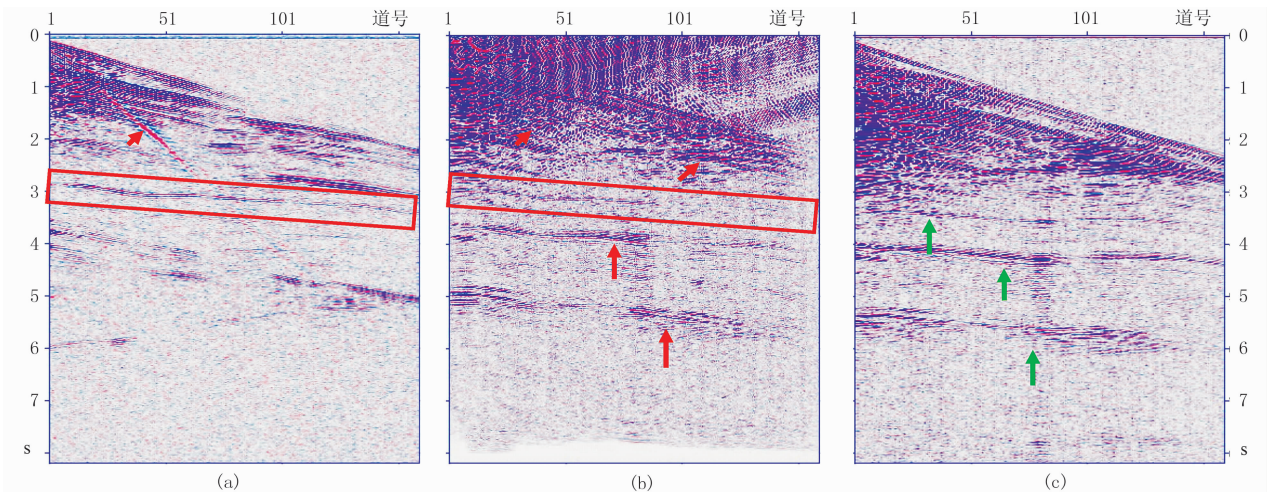


图7 相对平点处单炮地震记录对比

(a) 固体观测; (b) 拟固体观测; (c) 水面观测

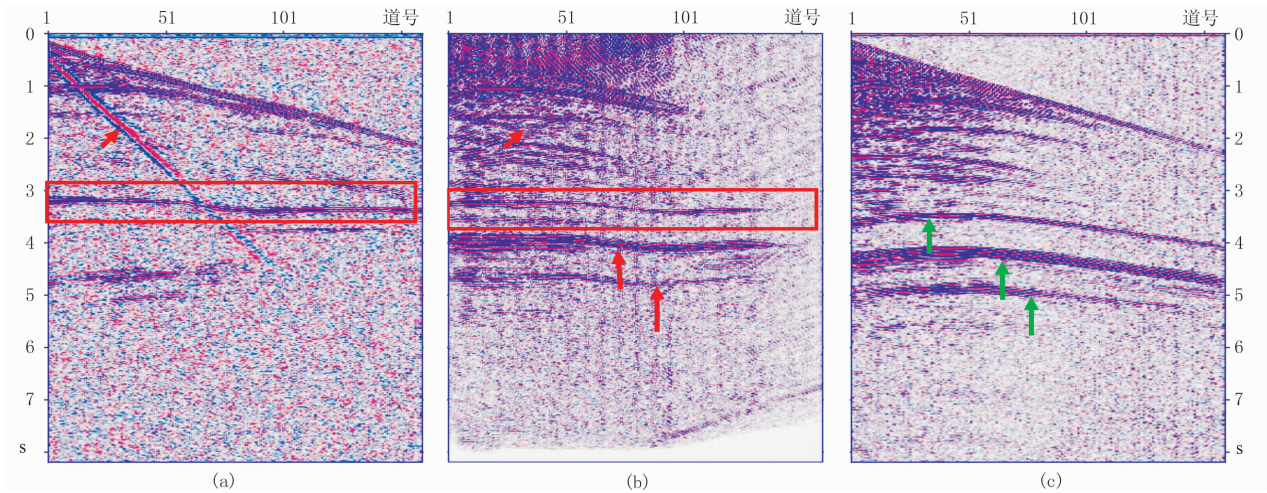


图8 相对凹点处单炮地震记录对比

(a) 固体观测; (b) 拟固体观测; (c) 水面观测

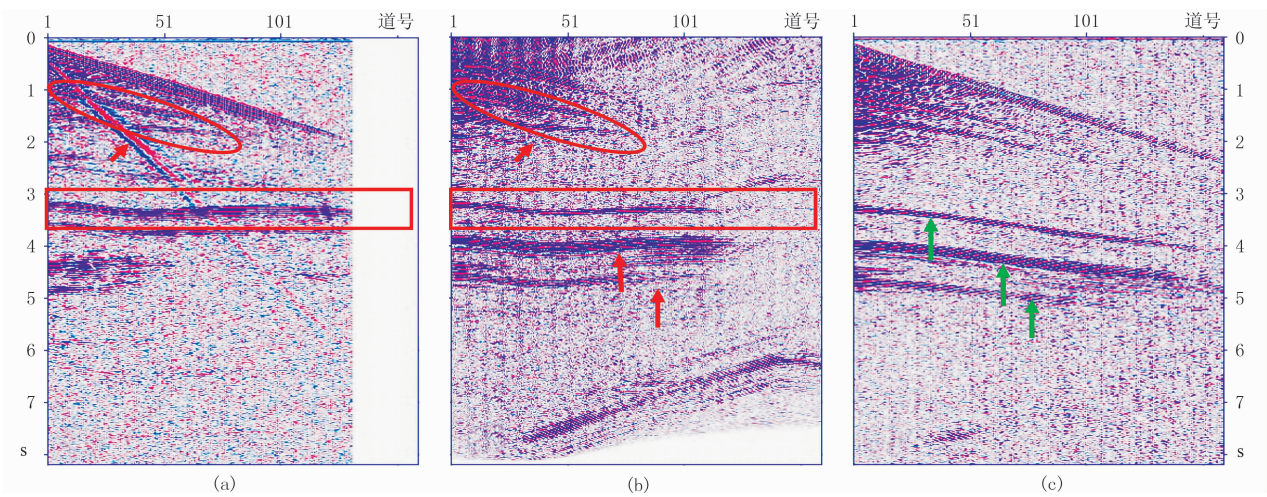


图9 相对凸点处单炮地震记录对比

(a) 固体观测; (b) 拟固体观测; (c) 水面观测

凹点和相对凸点处放炮,重构后地震信号在时间位置和形状上均发生很大改变(图 8b、图 9b);④矩形和椭圆形红色区域(图 7a、图 7b、图 8a、图 8b、图 9a、图 9b)指出了相同的地震信息所在位置,说明地下构造对应的地震信号可以通过水面采集获得,甚至水面采集到的地震信号的连续性更强(图 7b、图 8b、图 9b)。红色箭头指出了两种采集方法得到的不同地震信息,其中红色短箭头指示固体观测地震记录中的直达波干扰,红色长箭头指示拟固体观测地震记录中从水面观测延续而来的多次波,需要通过后期处理去除。

5 结论和展望

针对起伏地表物理模拟中采集难度大、采集速度慢、耦合误差大的问题,本文利用波场重构方法辅助实现起伏地表物理模拟快速采集,并得到如下结论:

(1)由水平层状模型和库车凹陷物理模型的数值模拟实验结果可以看出,文中方法能够保证重构波场的等价性。

(2)在实验过程中,通过对库车凹陷物理模型水面观测地震数据进行重构,重构结果与固体采集结果的相似性证明了文中方法在处理复杂起伏地表物理模型时的有效性。

(3)采用传统的接触式采集方法进行人工采集需要两周时间,而采用本文所提出的无接触采集方法,用机器采集只需要半天的时间。故该方法能够提高起伏地表物理模拟数据的采集效率。

(4)采用无接触方式避免了耦合误差,与传统的接触式固体采集方法相比,能够更加精确地反映地下构造信息。

尚需指出的是,新的快速采集方法在数值重构过程中会引入误差,为此,在后续研究中,需要针对起伏地表模型,研究更加完善的数值重构方法,并设计适合重构的观测系统,进一步提高起伏地表物理模拟的精度;在本文方法的基础上,能够很方便地对起伏地表实现三维采集。

参考文献

[1] Hestholm S O and Ruud B O. 2D finite-difference elastic wave modeling including surface topography.

- Geophysical Prospecting, 1994, 42(5): 371-390.
- [2] 黄自萍,徐伶俐,周继顺.起伏地表声波方程的数值模拟.石油地球物理勘探,2006,41(3):275-280.
Huang Ziping, Xu Lingli, Zhou Jishun. Numeric simulation of acoustic equation on relief surface. OGP, 2006, 41(3): 275-280.
- [3] 赵群.起伏地表的物理模型实验技术.中国地球物理学会第 22 届年会论文集,2006.
- [4] 魏建新,狄帮让.起伏地表地震物理模型测试技术.石油地球物理勘探,2006,41(6):619-625.
Wei Jianxin and Di Bangrang. Test technique of seismic physical model for relief surface. OGP, 2006, 41(6): 619-624.
- [5] Cary P W. Aliasing and 5D interpolation with the MWNI algorithm. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30: 3080-3084.
- [6] Cary P W, Perz M. 5D leakage: measuring what 5D interpolation misses. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012, 31: 3285-3289.
- [7] Wang J F, Wang S W. Hybrid 5D Fourier transform—a flexible tool for land data interpolation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 32: 3603-3607.
- [8] 严红勇,刘洋.基于时空域自适应高阶有限差分的声波叠前逆时偏移.地球物理学报,2013,56(3):971-984.
Yan Hongyong, Liu Yang. Acoustic prestack reverse time migration using the adaptive high-order finite-difference method in time-space domain. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 971-984.
- [9] 严红勇.粘弹性介质地震波场数值模拟与叠前逆时偏移方法研究[博士学位论文].北京:中国石油大学(北京)物探系,2012.
Yan Hongyong. Study on Numerical Modeling of Seismic Wavefields in Viscoelastic Media and Prestack Reverse-time Migration [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2012.
- [10] 刘洋,李承楚,牟永光.任意偶数阶精度有限差分数值模拟.石油地球物理勘探,1998,33(1):1-11.
Liu Yang, Li Chengchu and Mou Yongguang. Finite-difference numerical modeling of any even-order accuracy. OGP, 1998, 33(1): 1-11.
- [11] Liu Yang, Sen M K. Time-space domain finite-difference method with arbitrary even-order accuracy for the 2D acoustic wave equation. Journal of Computational Physics, 2013, 232(1): 327-345.

(本文编辑:刘勇)

作者简介



刘洋 博士研究生,1989年生;现为中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业博士研究生。研究领域为高精度的地震数值模拟、针对起伏地表的物理模拟、地震资料处理。