

基于复杂地表初至层析地震静校正技术研究 及数值模拟

张胤彬^{1,2}, 田忠斌², 温建亮^{1,2}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 100083; 2. 山西省煤炭地质物探测绘院, 晋中 030600)

摘要: 采用初至层析静校正方法, 解决地表起伏大、纵横向速度变化剧烈的复杂地区的折射静校正效果不好的问题。介绍初至层析静校正原理, 并根据需要建立横向速度变化大且基岩裸露的地震模型进行理论试算, 分析层析静校正的特点及适用条件, 指出层析静校正应注意的关键问题。利用数值模拟手段研究初至层析静校正的适用条件和应用效果, 为复杂地表煤层气地震资料静校正提供参考依据。结果表明: 层析静校正更适合复杂地表煤层气地震资料的处理, 能够很好地解决地表起伏问题和速度横向变化问题, 对提高煤层气勘探精度具有重要意义。

关键词: 复杂地表; 煤层气; 地震勘探; 静校正; 层析反演

中图分类号: P631.42

文献标志码: A

Study and numerical simulation of seismic tomographic statics based on complex surface

ZHANG Yin-bin^{1,2}, TIAN Zhong-bin², WEN Jian-liang^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Shanxi Coal Institute of Geological Geophysical Exploration and Mapping, Jinzhong 030600, China)

Abstract: First arrival tomographic statics method was applied to solve bad effects problem of refraction statics in large undulating surface, vertical and horizontal velocity rapidly changing complex areas. The principles of tomographic statics were introduced, large and exposed bedrock seismic model correction and lateral velocity variations were built for theoretical computation, characteristics and applicable conditions of chromatographic were analyzed, key issues of chromatography statics were noted. Numerical simulation tools were applied to study the early tomographic static correction application conditions and application effects, and a reference was provided for complex surface statics seismic data. The results show that tomographic static correction is more suitable for seismic data processing of complex surface. It is a good solution for the problem of surface undulation and lateral velocity change, and it is important for improving the accuracy of coalbed methane exploration.

Key words: complex surface; coalbed methane; seismic prospecting; statics; tomographic inversion

我国煤层气主要富集区有鄂尔多斯盆地、沁水、冀中、冀东、鲁西、濮阳、豫西、淮南、淮北、六盘水、辽宁中部、黑龙江中东部、陕西中北部、晋西北等地区^[1]。这些地区大部分属于复杂地表地区, 野外地震记录的信噪比低, 资料质量差, 静校正问题十分

突出。受复杂地表条件影响。一方面反射资料信噪比低, 不能精确成像, 另一方面静校正容易引起地下构造信息发生畸变, 产生假“构造”。因此, 静校正成为影响这些地区地震勘探效果的关键技术之一。

煤层气地震勘探既不同于油气地震勘探, 也不同

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174103); 教育部博士点基金资助项目(20110162130008); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013zzts054)

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 张胤彬, 教授级高工, 博士研究生; 电话: 0354-3983308; E-mail: zpdzyb@163.com

于常规的煤田地震勘探,其勘探精度要求较高,研究难度更大^[2-4]。因此,煤层气地震勘探的特点对静校正提出更高的要求。

在地表条件简单、有稳定折射层地区,折射静校正是一种简单有效的方法。其原理简单,计算量少,基本能满足实际需要。但是,在地表条件复杂地区,地形起伏和近地表速度强烈变化,使初至折射波走时很难高精度拾取。地震初至波不仅包含折射波,还包括由于断层、尖灭等复杂地质构造产生的绕射波、回折波等,难以有效拾取折射初至。因此,在复杂地表地区,折射静校正方法并不能满足实际需要^[5-6]。

为解决这些地区的静校正问题,初至层析静校正^[7-8]方法得到发展。1) 初至波传播距离短、能量损失小,具有信噪比高、畸变小、易于识别的优势,能很好地避开干扰波。因此,利用初至波解决静校正问题具有良好的先决条件。2) 初至层析静校正方法不需要区分初至曲线上的直达波、绕射波和折射波,可将这些波综合考虑,这样就克服了折射波静校正方法在复杂地区的局限性。3) 与野外表层调查技术相结合,初至波层析成像技术能够详细反演每一观测位置上的速度信息,不存在控制点与非控制点问题,而且层析成像本身能够很好地解决地表起伏问题和速度横向变化问题。综上所述,本文作者利用数值模拟手段研究初至层析静校正的适用条件和应用效果,为复杂地表煤层气地震资料静校正提供参考依据。

1 初至层析静校正原理

20世纪80年代,层析成像技术被地球物理工作者引入到地球物理勘探领域。在地震勘探中估算波在地下介质中的传播速度是一个很重要的问题,而层析成像技术能够通过接收炮点与检波点之间的地震波旅行时,利用计算机技术反演得到地下速度结构,从而为解决此问题提供一个切实可行的方法。DINES和LYTLE^[9]首先将层析成像技术引入到地球物理领域。随后,MCMECHEN^[10]、SOMERSTEIN^[11]、DAILY^[12]、DYE等^[13]、BISHOP等^[14]众多的地球物理工作者对地震层析成像的方法技术和理论原理进行广泛而深入的研究。地震层析成像技术被应用到实际资料处理是从20世纪90年代开始的。

地震层析成像技术是指在已知某种地震波旅行时的情况下反演求解地下介质的速度场。地震波的旅行时间是对地下介质慢度函数沿着波的传播射线路径的进行线性积分,可表示为

$$t = \int_s^r s(x, z) dl \quad (1)$$

式中: $s(x, z)$ 是指地下介质的慢度函数, dl 是指波的射线路径的微分, t 是指地震波从震源 s 到检波点 r 的走时。波的传播射线路径与地下介质的慢度函数 $s(x, z)$ 以及地震波的类型有关系。

将式(1)离散后,可将其写成如下代数方程组,矩阵形式为

$$T = AS \quad (2)$$

式中: T 表示为所有炮点到检波点的旅行时矩阵, S 是指地下介质的慢度矩阵, A 是与地震波传播射线路径有关的距离矩阵。在慢度函数 $s(x, z)$ 已知的情况下,可以选择多种方法求解出给定类型波的旅行时矩阵 T 和距离矩阵 A 。

层析反演是指在已知地震波的旅行时矩阵 T 的条件下反推出慢度函数 $s(x, z)$ 。由于距离矩阵 A 也是未知的,直接从上式求出 S 是不可能实现的。因此,必须先对 S 做出假设,再利用正演方法求出射线路径 A 和走时 T ,最后通过比较实际走时和正演计算得到的走时,求出走时差矩阵 ΔT ,慢度矩阵 S 的修正量为 ΔS , ΔT 与 ΔS 的关系可表示为

$$\Delta T = A \Delta S \quad (3)$$

式中: ΔT 、 A 已知,可用很多方法求出 ΔS 。用 ΔS 对原 S 进行修正得到新的慢度场 S ,然后再利用正演计算得到新的射线路径 A 和旅行时差 ΔT ,从而求得对 S 的新的修正量 ΔS ,并对慢度场加以修正。如此反复迭代计算,直到 ΔT 满足一定的精度要求为止。

在求出的速度场之后,结合测线高程等信息就可计算出静校正量。低速带速度反演和静校正计算的基本流程如图1所示。

2 理论模型试算

本文作者通过 GX2 软件系统建立地质模型并对地质模型进行正演计算,模拟产生单炮记录。软件使用 Virieux 发展的交错网格差分格式来求解二维非均匀介质的弹性波波动方程组,正演模拟非均匀介质中传播的声波和弹性波,真实地模拟波在非常复杂的地质介质中的全波场传播状况,具有较高的精度和较快的速度。计算合成地震记录道、波前时间能量记录和一系列波场的快照、生成各种与实际生产因素相同的地震记录结果(炮记录、叠加剖面、偏移剖面、叠前

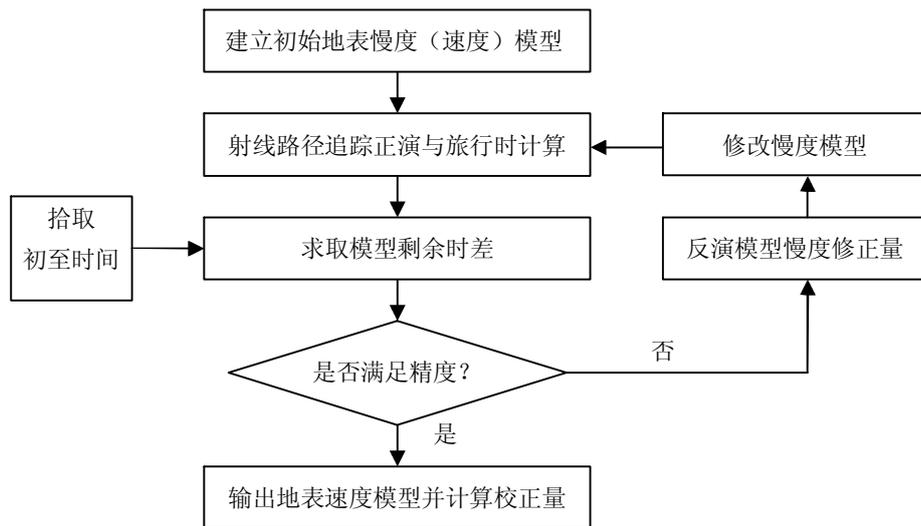


图 1 层析静校正处理主要流程

Fig. 1 Main flow path of chromatography statics

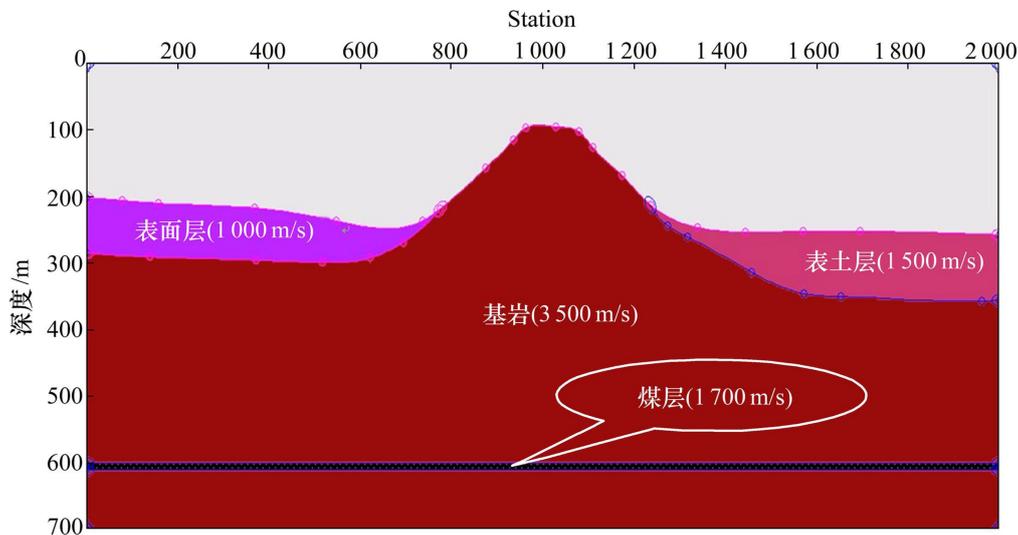


图 2 基岩出露模型

Fig. 2 Bedrock outcrop model

深度偏移剖面等), 可用来指导资料解释, 或修正已建立的地质概念模型。

模型设计如图 2 所示, 模型水平方向排列长度为 2 000 m, 模型左边表土层速度为 1 000 m/s, 厚度在 80 m 左右, 在排列中部 800~1 200 m 的区域为一块高度在 100 m 左右的基岩出露, 排列右边表土层速度为 1 500 m/s, 厚度在 100 m 左右; 在深度 400 m 左右有一厚度为 10 m 的煤层。本模型主要模拟分析在地表不均匀、速度横向变化的地区层析静校正及折射静校正方法的适用性。

正演模拟放炮 101 炮, 炮间距 20 m, 道间距 10 m,

最大偏移距 800 m。图 3 所示为弹性波正演模拟单炮记录, 炮点位于测线 500 m 处, 此时炮点在基岩露头处; 记录长度 1 s, 采样间隔 0.5 ms, 震源子波主频 40 Hz。从单炮记录上看, 由于地表不均匀且地表起伏, 煤层反射波产生严重扭曲。

应用初至层析静校正方法对图 3 资料进行处理, 图 4 所示为层析反演得到的速度场, 图中表土层底界与模型有较好的一致性, 反演速度场与模型基本一致。图 5(a)所示为应用层析静校正之后的单炮记录, 在应用层析静校正量后, 煤层反射波双曲线形态得到了很好的恢复。

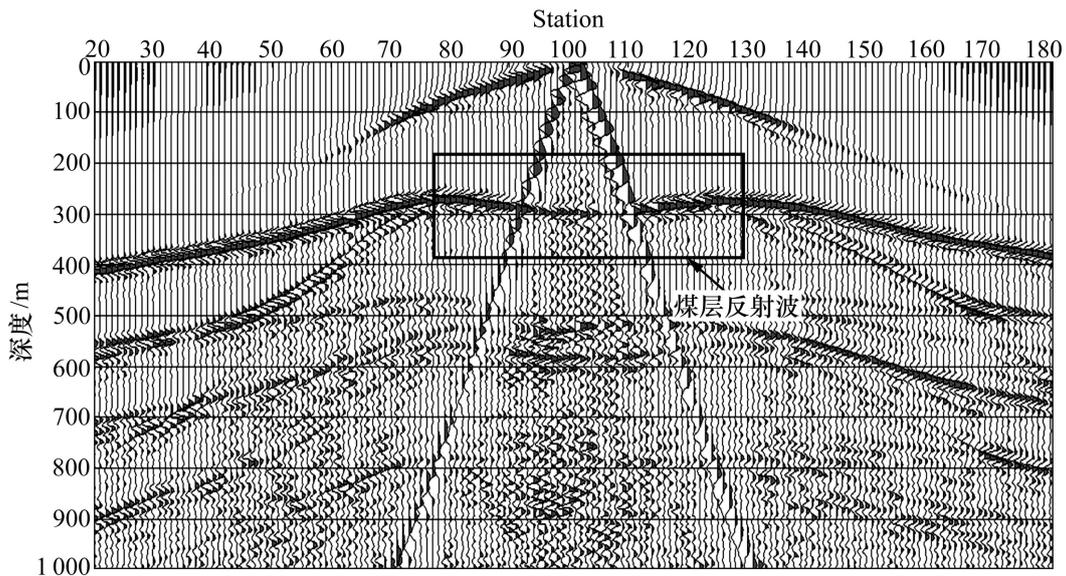


图3 模拟单炮记录模型(炮点在基岩露头处)

Fig. 3 Simulated single-shot record model (Shot on bedrock outcrops)

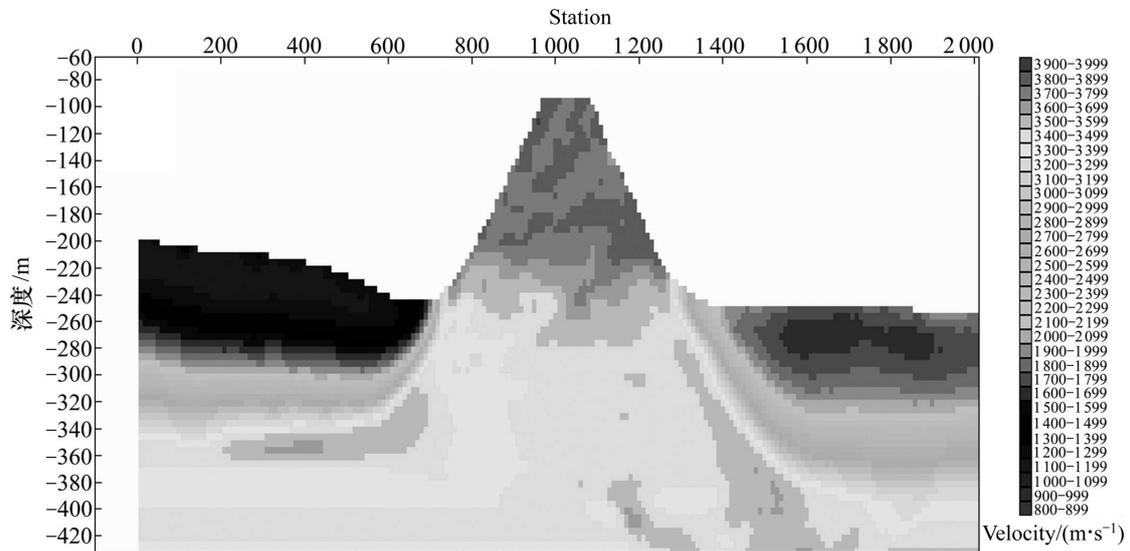


图4 层析反演的速度场模型

Fig. 4 Tomographic inversion of velocity field model

在做折射静校正处理时,在输入表土层速度阶段,在两个表土层处加入两个微测井信息,给定比较准确的表土层速度与深度。图 5(b)所示为应用折射静校正之后的单炮记录。从图 5(b)可以看出,应用层析静校正与这静校正的单炮记录相差无几。图 6(a)所示为层析静校正量、折射静校正量与理论静校正量的对比图。从图 6(a)可以看出,层析静校正量整体误差要比折射静校正量小。图 6(b)所示为层析静校正误差与折射静校正误差对比图,层析静校正最大误差为 10 ms,折射静校正最大误差为 12 ms。从层析静校正误差曲线

上看,在基岩出露区域(桩号在 80 到 130 附近,对应模型水平方向 800~1 300 m),测线两端误差整体比较大。因为层析成像方法是应用射线追踪技术模拟地震波走时,在近炮点附近,射线密集,在远炮点处,射线稀疏。在高速岩石地表区,由于屏蔽作用,难以得到足够的射线密度反演速度结构,从而影响静校正的结果。

在地形起伏较平缓的地区层析静校正方法与折射静校正方法都可以取得比较好的效果。但在地形起伏比较剧烈的地区,折射层极不稳定,不符合折射静校

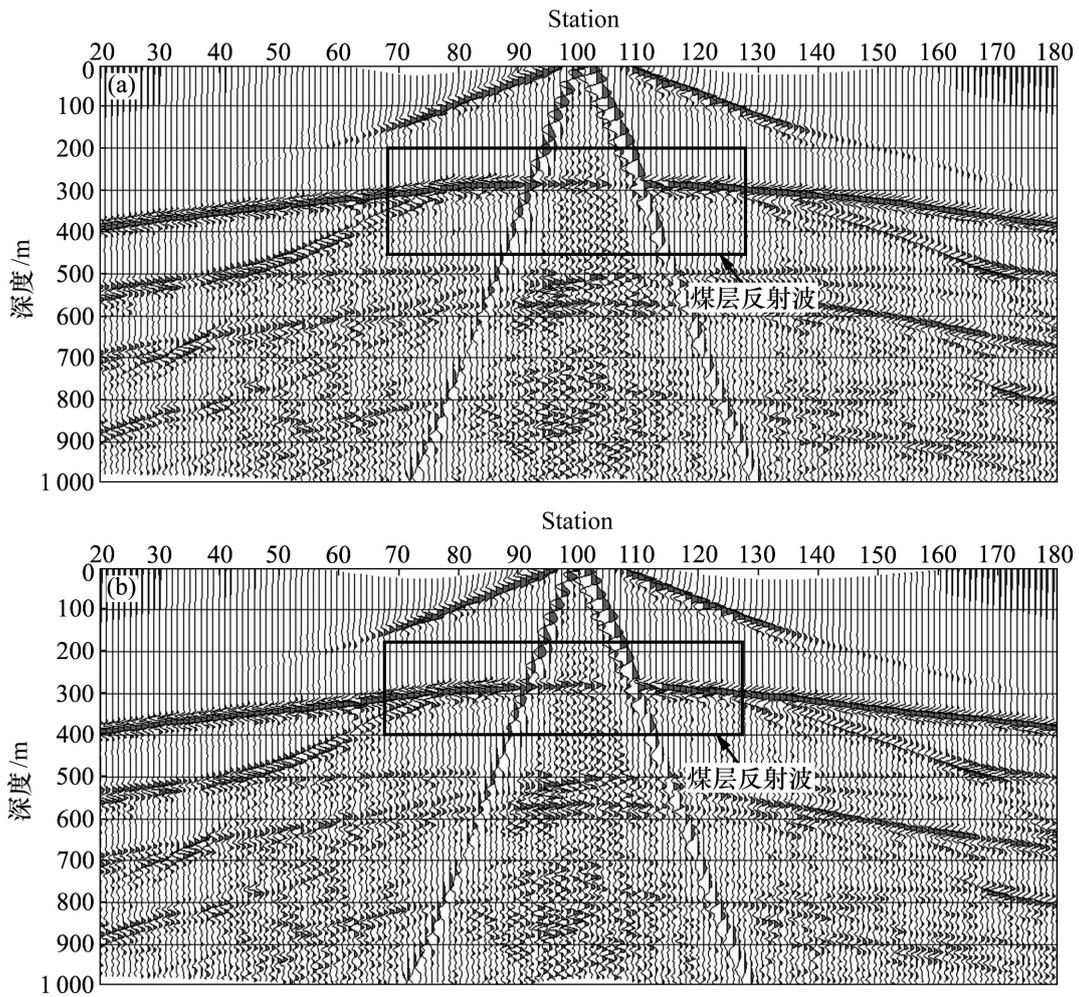


图 5 静校正单炮记录

Fig. 5 Statics for single shot record: (a) Tomographic static correction; (b) Refraction statics

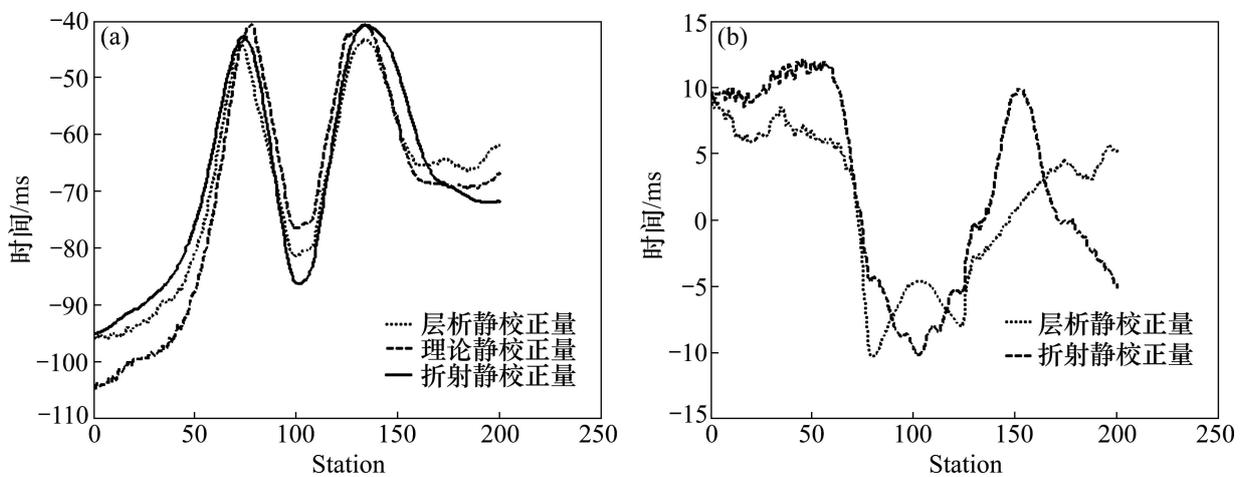


图 6 层析和折射静校正与理论静校正对比图

Fig. 6 Comparison charts of chromatography and refraction statics with theoretical statics: (a) Statics; (b) Error

正的假设条件, 导致折射静校正效果比较差, 继而导致叠加剖面上的构造假象。而层析静校正将地表划分

成不同的速度的网格, 不受地形起伏及速度横向变化的影响, 故可以取得更好的效果。

3 实际资料应用

结合以上理论模型试算结论,对沁水盆地某区块煤层气地震二维资料 EW470 线做初至层析静校正处理分析。图 7 所示为测线高程变化和层析静校正量对应图。从图 7 可以看出,该线右端高程变化十分剧烈,最大高差达 370 m,地表高程变化引起严重的静校正问题。

图 8 所示为测线中炮号为 125 的各种静校正前后的单炮剖面。其中,图 8(a)所示为未作任何静校正的原始记录,图 8(b)所示为应用初至折射静校正之后的单炮记录,图 8(c)所示为应用初至层析静校正之后的单炮记录。从单炮记录上看,在左半段地形起伏小的地方,两者效果基本一致,而在右半段地形起伏大的地方,层析静校正效果好于折射静校正。初至折射静校正由于对复杂地形及变化多样的地貌单元建立的近地表模型精度低于层析折射静校正,虽然两种静校正后剖面总体形态相近,但层析静校正模型更加精细,校正的效果优于折射静校正。图 9 和图 10 所示分别为

折射静校正和层析静校正前后的叠加剖面,同时可以看到线框标示处两种方法静校正前后巨大的差异。校正前剖面,煤层连续性几乎中断,造成许多可能误判的假构造。静校正后,使得剖面很好地恢复其地质构造的真实性,为提高煤层气丰度预测提供较好的基础保障。相比之下,层析静校正方法使反射波延迟恢复更为明显,能量更强,而且深部反射波也清晰可见。

二维地震资料的实际处理表明:在复杂地表地区,从校正之后的单炮记录上看,初至层析静校正效果好于折射静校正效果,继而使得最后的叠加剖面有较大改善。这是由于折射静校正方法是在简单层状模型假设之下,利用初至折射波来反演近地表速度场。在复杂地表地区地表起伏、速度横向变化、初至波场复杂,违背折射静校正方法假设,最后导致假的构造。而初至层析静校正方法假设地表为不同的速度场,初至波类型可以是直达波、折射波、绕射波等不同类型的波,更适合地表条件复杂的地区静校正问题的解决,在实际地震资料的处理当中取得较好的效果。结合煤层气富集区域的地表特点及煤层气地震勘探的特殊要求,初至层析静校正方法更适合煤层气勘探中解决静校正问题。

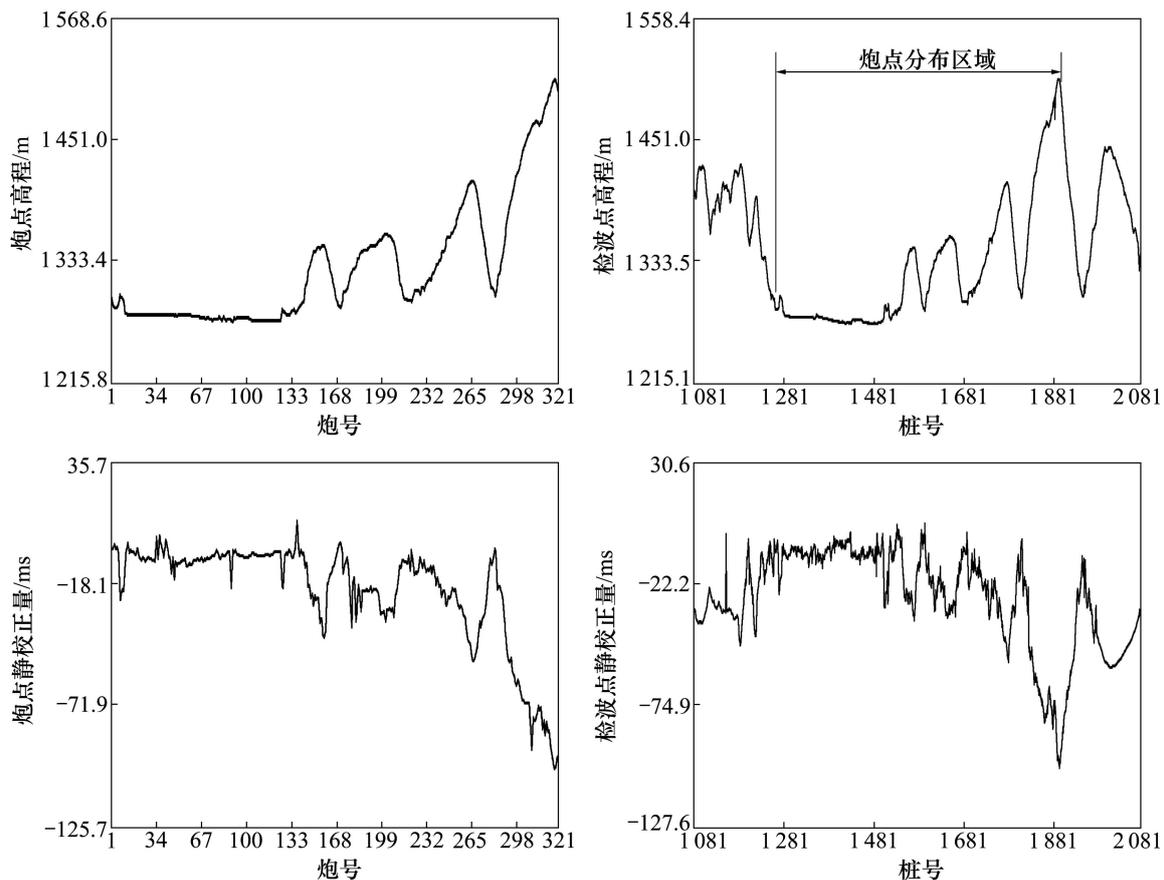


图 7 测线高程及初至层析静校正量

Fig. 7 Survey line elevation and chromatography statics

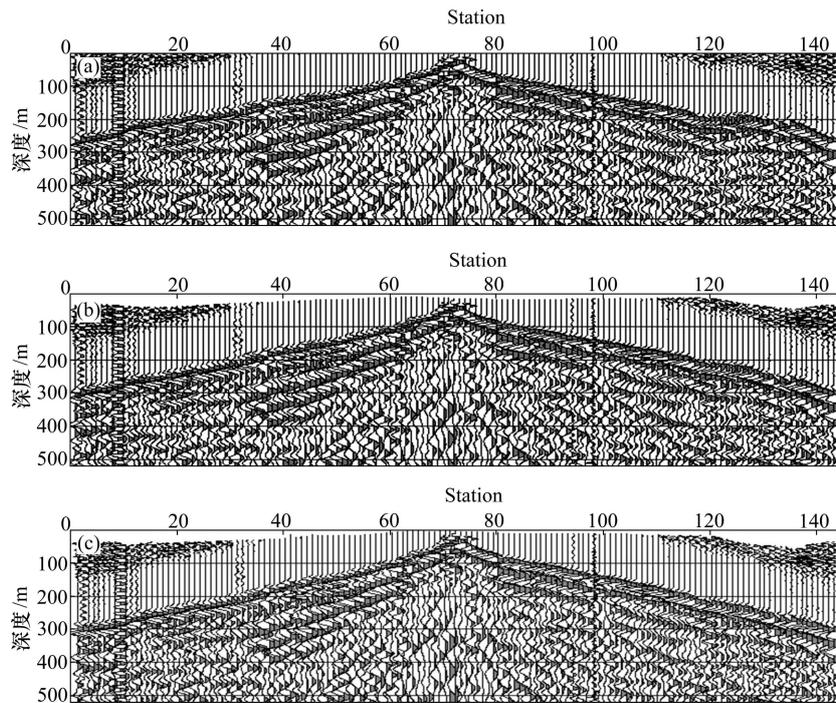


图 8 单炮记录静校正前后对比图

Fig. 8 Shot records before and after comparison chart statics: (a) Original shot record; (b) Refraction statics shot record; (c) Correction shot record

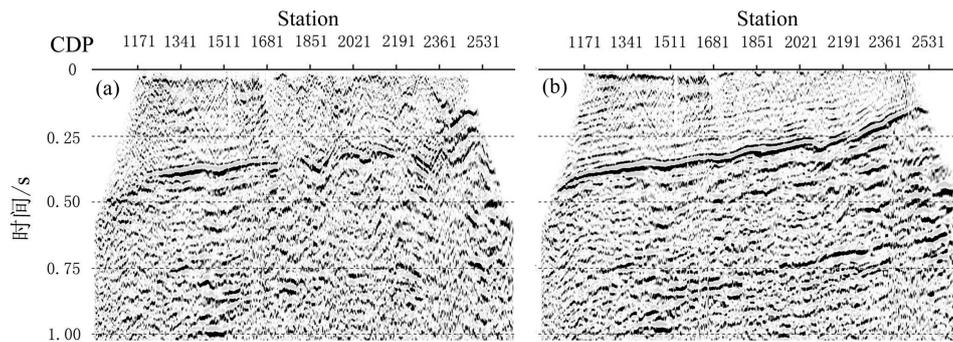


图 9 折射静校正前后叠加剖面

Fig. 9 Stacked sections: (a) Before corrected; (b) After correction

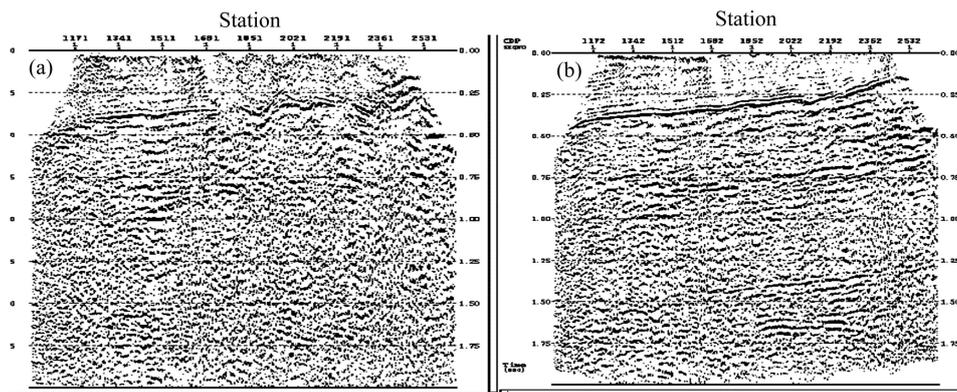


图 10 层析静校正前后叠加剖面

Fig. 10 Tomographic static stack sections: (a) Before corrected; (b) After correction

4 结论

1) 折射静校正方法在建立近地表速度模型时,需要输入准确的表层速度,这在速度横向变化剧烈的复杂地区是难以实现的。不同于基于简单层状模型假设的折射静校正方法,初至层析静校正将地表划分为独立的速度网格,利用初至波走时反演近地表速度场,不论是在速度横向变化的地区还是地表起伏剧烈的地区,均可取得比较好的效果。

2) 在初至层析静校正的实际应用过程中,需要综合考虑其正反演算法、初至质量、初始模型、叠加次数和反演网格大小等各方面因素的影响,才能取得理想的效果。

3) 在地形起伏剧烈、地表不均匀、横向速度变化的地表条件下,初至层析静校正效果好于折射静校正效果;由于煤层气勘探区域大多属于复杂地表条件,结合煤层气勘探过程中对勘探精度的要求,在煤层气勘探区域,尽量选用初至层析静校正方法。

REFERENCES

- [1] 苏现波, 陈江峰, 孙俊民. 煤层气地质学与勘探开发[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
SU Xian-bo, CHEN Jiang-feng, SUN Jun-min. CBM geology and exploration and development [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 刘贻军, 娄建青. 中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 68-71.
LIU Yi-jun, LOU Jian-qing. China CBM reservoir characteristics and development techniques [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(1): 68-71.
- [3] 张新民, 解光新. 我国煤层气开发面临的主要科学技术问题及对策[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(2): 126-133.
ZHANG Xin-min, XIE Guang-xin. CBM development in our country facing major scientific and technological problems and countermeasures [J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(2): 126-133.
- [4] 杨立雄. 我国煤层气勘探存在的问题及其建议[J]. 中国煤炭, 2004, 30(3): 48-49.
YANG Li-xiong. Problems of CBM exploration and suggestions [J]. China Coal, 2004, 30(3): 48-49.
- [5] 苑益军. 复杂地表地区静校正技术应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2003.
YUAN Yi-jun. Complex surface area static correction technology application research [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2003.
- [6] 张印堂. 折射层析反演静校正及其在伊朗卡山地区的应用[J]. 油气地球物理, 2005, 3(3): 11-14.
ZHANG Yin-tang. Refraction tomographic inversion static correction and its application in Yilangka Mountain region [J]. Petroleum Geophysics, 2005, 3(3): 11-14.
- [7] 张建中. 近地表介质地震初至波层析成像[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(1): 63-66.
ZHANG Jian-zhong. Near surface medium primary wave seismic tomography [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2004, 43(1): 63-66.
- [8] 张丽. 复杂地区静校正技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
ZHANG Li. Complex areas statics research [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [9] DINES K A, LYTLE R J. Computerized geophysical tomography [J]. Proc IEEE, 1979, 67(2): 1065-1073.
- [10] MCMECHAN G A. Seismic tomography in boreholes [J]. Geophys J Roy Astr Soc, 1983, 74(5): 601-612.
- [11] SOMERSTEIN S F, BERG M, CHANG D, CHUNG H, JOHNSON H, RICHARDSON B, PIZZICARA J, SALISBURY W W. Radio-frequency geotomography for remotely probing the interior of operating mini and commercial sized oil-shale retorts [J]. Geophysics, 1984, 49(5): 1288-1300.
- [12] DAILY W D. Underground oil-shale retort monitoring using geotomography [J]. Geophysics, 1984, 49(2): 1701-1711.
- [13] DYER B C, WORTHINGTON M H. Seismic reflection tomography: A case study [J]. First Break, 1988, 21(6): 354-366.
- [14] BISHOP T N, BUBE K P, CUTLER R T. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media [J]. Geophysics, 1985, 50(2): 903-913.

(编辑 彭超群)