

文章编号: 1673-500X(2006)05-0019-04

起伏地表条件下的波场上延法叠前深度偏移

田文辉^{1,2}, 李振春³, 张辉³, 孙小东³

(1. 中国石油大学 研究生院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100083;
3. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要 直接从起伏地表开始的叠前深度偏移方法是分析复杂地表和复杂地质体成像的有效手段。借鉴 Beasley 和 Lynn 提出的“零速层”的概念与 Reshet 提出的“逐步-累加”法的思路, 根据地震波在真实介质中的传播特性及波的可叠加性, 利用“波场上延”法, 实现基于相移(时间域)法上延和频率空间域有限差分(深度域)法(ω - x FD)上延的波动方程叠前深度偏移成像。理论分析和模型试算结果表明, “深度域”波场上延”法是解决起伏地表和地下复杂构造双重成像的一种有效方法, 实现了波动方程基准面校正和深度域成像的有机结合, 其有效性和准确性使该方法可用于实际资料的处理, 有较好的应用前景。

关键词 起伏地表; 波动方程; 波场上延; 波场外推; 叠前深度偏移

中图分类号 P 631.443 **文献标识码** A

Wave-field upward continuation pre-stack depth migration based on irregular topography

TIAN Wen-hui^{1,2}, LI Zhen-chun³, ZHANG Hui³, SUN Xiao-dong³

(1. Graduate School in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;
2. Company of Exploration and Development, China National Petroleum Corporation, Beijing 100083, China;
3. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: Pre-stack depth migration which starts directly from undulating earth surface turns out to be a valid way to deal with irregular topography and complex geologic structures. According to zero velocity layer brought out by Beasley and Lynn, and the method of summation step by step put forward by Reshet, and the characteristics of wave propagation in real media and wave stacking, the method of wave field upward continuation to realize wave-equation pre-stack depth migration and imaging based on phase shift (in time domain) and finite difference (in depth domain) was put forward. Theoretical analysis and model tests show that the method of wave field upward continuation in depth domain is a valid method to solve the problems of the dual-imaging of irregular topography and complex geological structures, and can effectively combine wave equation redatuming with depth imaging, whose effectiveness and accuracy make it apply to actual data processing with a good prospective.

Key words: irregular topography; wave equation; wave field upward continuation; wave field extrapolation; pre-stack depth migration

随着地震勘探技术的不断发展, 油气地震勘探的重点正转向起伏地表条件和复杂地质条件的区域, 如山地、滩海和沼泽地区等, 这对地震勘探工作及资料处理提出了新的挑战。在常规处理中, 通常采用高程基准面静校正的办法^[1]消除地形起伏的影响, 其处理精度不能满足要求。针对高程基准面校正所带来的问题, 许多学者做了大量的工作, Berryhill^[2]首先提出

波动方程基准面校正的概念; 几年后, 他又将这个思路扩展到叠前^[3]。Reshet^[4]提出“逐步-累加”波场外推的概念, 解决了地表起伏变化剧烈对地下构造成像的影响问题; Beasley 和 Lynn^[5,6]提出很有新意的“零速度层”的概念; 何英等^[7]借鉴 Beasley 和 Lynn 提出的“零速层”的概念与 Reshet 提出的“逐步-累加”法的思路, 根据地震波在真实介质中的传播特性及波的可

收稿日期: 2005-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40474041)

作者简介: 田文辉(1962-), 男(汉族), 云南文山人, 高级工程师, 博士研究生, 现在中国石油天然气勘探开发公司从事地震勘探技术的研究与管理工作。

叠加性提出了“波场上延”法。笔者根据“波场上延”法的思想,来实现基于相移(时间域)法上延和频率空间域有限差分(深度域)法(ω - x FD)上延的波动方程法叠前深度偏移成像。

1 方法原理

1.1 逐步-累加法

以色列学者 Reshef^[4]首次提出“逐步-累加”波场外推的概念,即在采用深度外推时进行基准面校正和偏移。具体做法是将波场从一个水平基准面向下延拓,并在每一个深度步长上将所截得的地形面上的波场值加到延拓的波场中,这样就可以对起伏地形上的记录进行叠前或叠后偏移。

1.2 波场上延法

“波场上延”法^[7]是从地震波在真实介质中的传播规律出发,借鉴 Beasley and Lynn^[5-6]提出的“零速层”的概念与 Reshef 提出的“逐步-累加”法的思路而提出的。具体实现过程为:首先把基准面定在炮集所在区域地面的最高点或最高点之上的某一高度,将炮记录以任意速度(最好用接近地表层的速度)向上延拓到所定义的基准面上,将非水平观测变成水平观测。在“波场上延”这一过程中,可以使用频率空间域有限差分法和最简单的相移法波动方程波场外推进行波场延拓,运用常规偏移算子做偏移。这里以相移法波动方程波场外推为例说明“波场上延”的实现过程。

在迪卡尔坐标系下,上行波向上深度外推(即波场上延)的相移法公式为

$$\tilde{P}(x, z, \omega) = \tilde{P}(x, z + \Delta z, \omega) \exp(ik_z \Delta z), \quad (1)$$

其中

$$k_z = (\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2)^{1/2}.$$

式中, $\tilde{P}(x, z, \omega)$ 是水平位置为 x 、深度为 z 、频率为 ω 时的压力场; Δz 为深度外推步长; c 为速度; k_x, k_z 分别为空间 x 和深度 z 方向上的波数。

引用相移公式只是因为它能清楚地表达波场逐步外推的思想和概念,虽然它对地下复杂构造横向速度变化剧烈的地区不能很好地偏移成像,但丝毫不影响表达该方法的思想。此外,插入的虚拟层中的速度是一常数。

当从不规则记录面上开始进行波场向上外推时,式(1)可写成以下表达式:

$$\tilde{P}(x, z, \omega) = \sum \tilde{P}(x, z + \Delta z, \omega) + \tilde{P}_{in}(x, z + \Delta z, \omega) \exp(ik_z \Delta z). \quad (2)$$

式中, \tilde{P}_{in} 是原来记录在 $(x, z + \Delta z)$ 处的波场值。

由式(2)可以看到,某一个点 (x, z) 的波场值 $\tilde{P}(x, z, \omega)$ 是上延至此的波场与该位置所记录的波场值之和。如果假设记录数据中只有上行波,而且延拓过程中没有遇到其他波场能量加入,则左端 $\tilde{P}(x, z, \omega)$ 只会含有从更高的位置延拓下来的波场,也就是说 \tilde{P}_{in} 项为零。当外推水平记录面的波场或外推尚未到达地表最高点处的接收点时,会出现这种情况。

2 模型试算

图1是模拟的山包沟谷地形的速度-深度模型。图中的第一个起伏界面为地表,地表下首先是一层速度为 1900 m/s 的降速带,下面为 3 层较为平坦的地层,再往下为具有高陡倾角的复杂构造。地形变化的最大海拔高度为 412 m,最小海拔高度为 60 m,以海平面为基准面。模拟的野外放炮方式为中间放炮两边接收,接收道数为 120 道,最大偏移距为 2950 m,最小偏移距为 25 m,记录道长为 3 s。地表层速度 v 为 1900 m/s,道距 Δx 为 10 m,炮间距为 100 m,时间采样率 Δt 为 1 ms,总炮数为 80 炮。

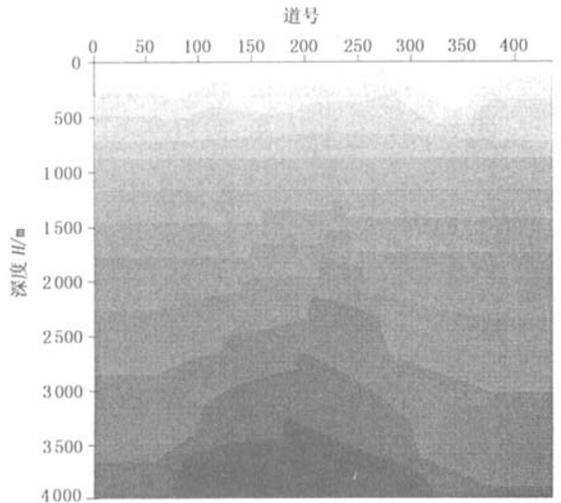


图1 速度-深度模型图

2.1 不同虚拟层速度对延拓波场及成像效果的影响

从理论上讲,深度域“波场上延”法可以使用任意虚拟层速度对波场进行向上延拓,而时间域“波场上延”法考虑到时间域波场延拓算子对横向变速的适应性较差,其横向变速会明显改变波场的运动学和动力学特征,使成像效果变差。理论模型试算验证了上述理论的正确性和深度域方法的有效性。

图2给出了波场上延前单炮模拟记录,可以看到由于地表地形起伏的影响,记录中的同相轴发生弯曲。使用等于近地表速度为 1900 m/s 的虚拟层

速度向上延拓,可以看到相移法使原本每层的一个同相轴变成了两个同相轴,这是由于相移法是时间域偏移,不考虑横向变速,没有对相移后的结果进行时移处理所致(图3(a));而使用深度域 ω - x FD法,由于考虑了强横向变速的影响,使原来弯曲的同相轴变成了光滑的近似双曲型的同相轴(图3(b))。其他虚拟层速度计算的结果同样说明了在构造复杂、横向变速强烈的地区,做深度域延拓的重要性和有效性(图3(c)和图3(d))。

两种方法对上述叠前模拟炮记录做偏移成像的结果如图4所示。图4(a)和图4(b)是使用相移法上延后的叠前深度偏移结果,图4(c)和图4(d)是使用 ω - x FD算子上延后的叠前深度偏移结果。由图4可以看出,深度域 ω - x FD上延法在起伏地表成像、同

相轴连续性、抗干扰能力、浅中深层构造成像精度等方面,均明显优于时间域相移上延法。

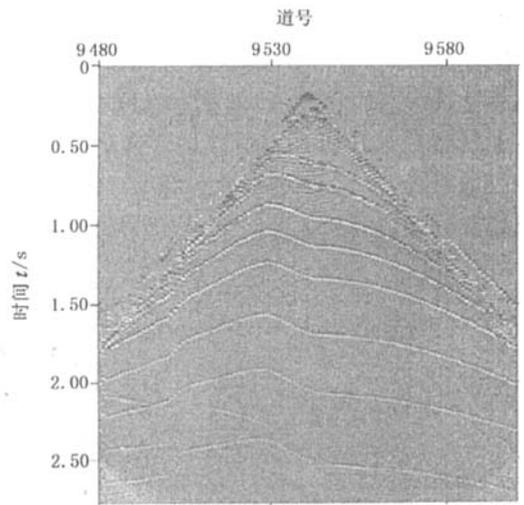


图2 单炮模拟记录

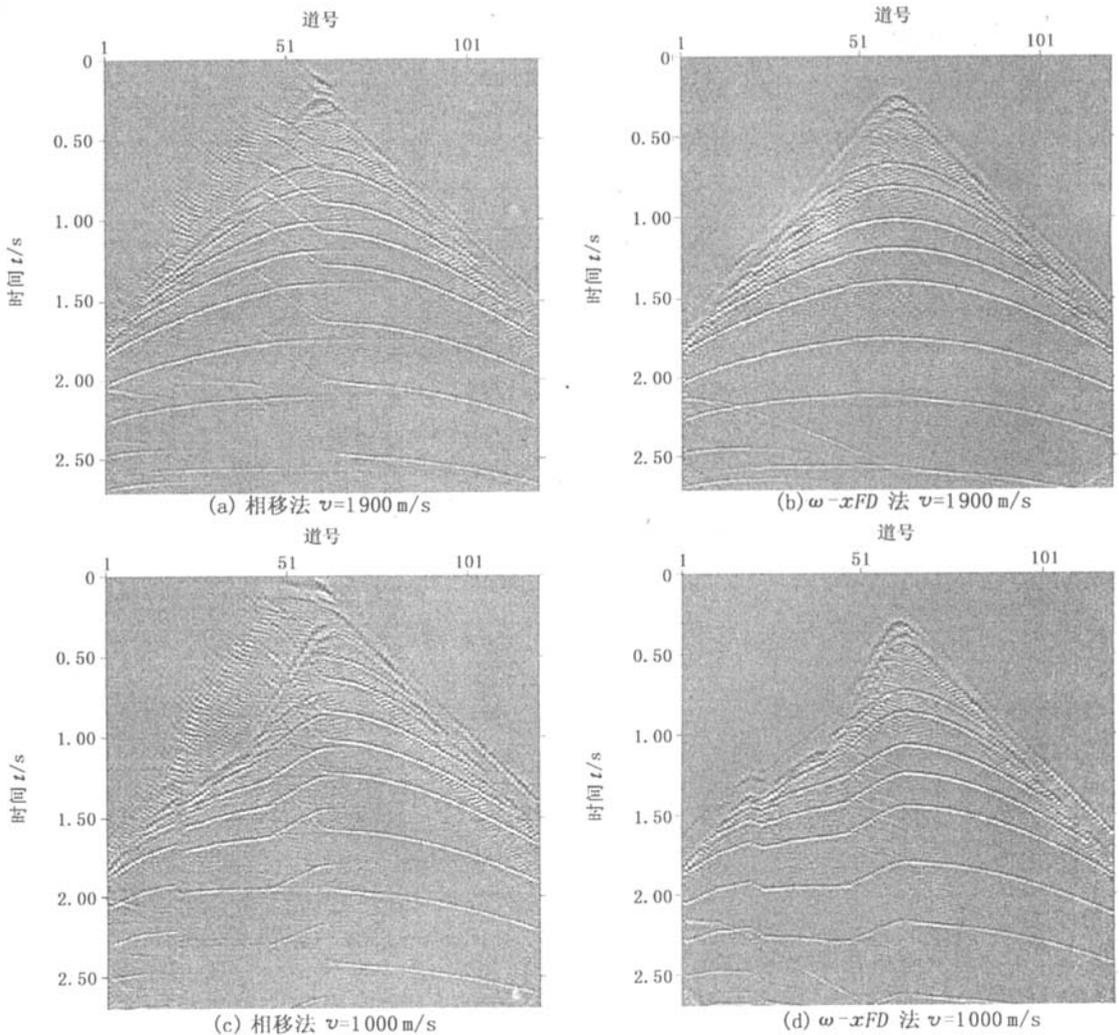


图3 波场上延后的单炮记录(v 为虚拟层速度)

2.2 上延法对深度偏移效果的影响

由图4可知,在相同虚拟层速度,相同偏移成像方法的条件下,使用相移法上延后的偏移结果,起伏地表成像模糊,浅中层成像效果不理想,深层构造轮廓不清晰,断点不干脆;而使用 ω - x FD法深度延拓算子上延后的偏移可以对起伏地表及地下复杂构造实现双重成像,能较好地消除地形剧烈起伏变化对地下复杂构造的影响,对地下地质构造有清晰而准

确的成像。但是,深度域“波场上延”法仍然不能完全消除地表剧烈变化和波场上延对地下复杂波场成像的影响,这主要体现在图4(a)和图4(b)中的同相轴局部发生错断和局部画弧现象,见图中圆圈标注。在其他图的对应部分,上述现象更明显一些,而且可以看出它们出现的位置对应于地表起伏最剧烈位置的下方。可见该方法还不能完全消除复杂起伏地表和波场上延对地下复杂波场成像的影响。

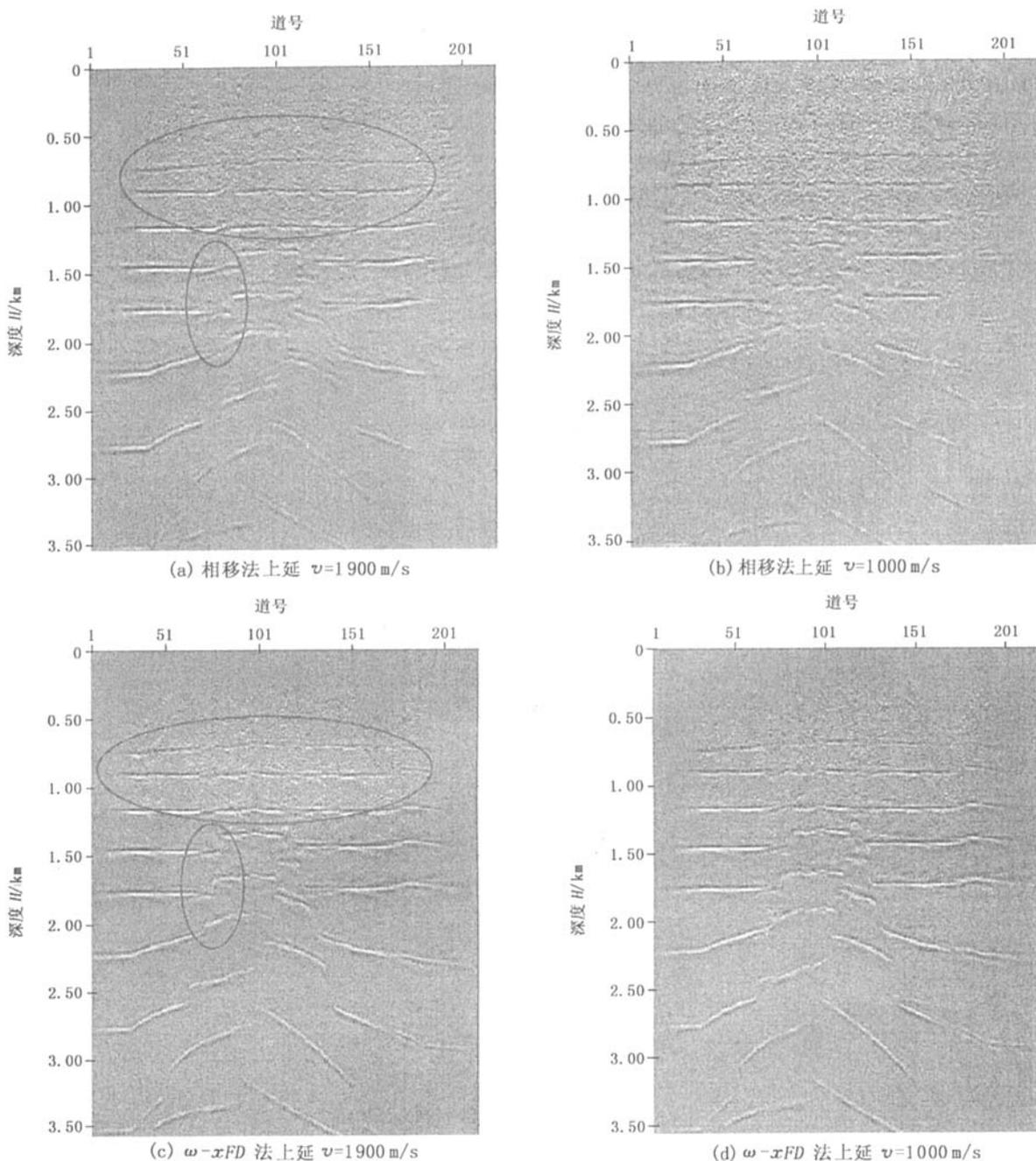


图4 波场上延后两种方法叠前深度偏移结果

(下转第26页)

素的研究[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(2):132-135.

LI Shu-guang, ZHANG Jun, HU Song-qing. Influence factors for direction of unidirectional hydrophone[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2003, 27(2):132-135.

[3] 宋丽莉,葛洪魁,王宝善.疏松砂岩弹性波速模型的研究[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):38-40.

SONG Li-li, GE Hong-kui, WANG Bao-shan. Study of model for elastic wave velocity of unconsolidated sandstone[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science) 2004, 28(6):38-40.

[4] 吴学兵,李树平,张栋.二次定位系统检测技术开发与研究[J].石油仪器,2005,19(1):61-64.

WU Xue-bing, LI Shu-ping, ZHANG Dong. Development of the testing technology for digipoint system[J]. Petroleum Instruments, 2005, 19(1):61-64.

[5] 宁靖,刘志田,吴学兵,等.海底水听器低频声纳-初至波联合定位方法研究[J].石油仪器,2005,19(1):39-42.

NING Jing, LIU Zhi-tian, WU Xue-bing, et al. Low

frequency sonar & first break co-positioning method for hydrophone second positioning[J]. Petroleum Instruments, 2005, 19(1):39-42.

[6] 杨京涛,朱伟强,秦豹.海上二次定位技术的研究与应用[J].石油物探,2002,41(增刊):67-69.

YANG Jing-tao, ZHU Wei-qiang, QIN Bao. Study of second position techniques for oil exploration and its application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(Supply):67-69.

[7] 曾湘轶,杨文艳.浅析海底电缆地震采集作业二次定位系统[J].石油地球物理勘探,2001,36(2):220-226.

ZENG Xiang-yi, YANG Wen-yan. Brief analysis of secondary positioning system in seismic sea-bottom cable acquisition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(2):220-226.

[8] 姜瑞林.海底电缆水下声波二次定位成果质量分析[J].石油仪器,1996,10(5):23-25.

JIANG Rui-lin. Quality analysis for the bottom cable acoustic positioning result[J]. Petroleum Instruments, 1996, 10(5):23-25.

(编辑 沈玉英)

(上接第22页)

3 认识与结论

(1)深度域‘波场上延’法可以把非水平观测界面记录改造成水平观测界面记录,然后利用常规偏移算子进行深度域成像.深度域‘波场上延’法是实现起伏地表和地下复杂构造双重成像的有效方法.

(2)深度域‘波场上延’法能够解决地形复杂的地震资料成像难的问题,结果能够较准确地反映地下构造形态,深度成像效果比较令人满意,基本实现了波动方程基准面校正与波动方程叠前深度偏移有机的结合.模型成像说明了该方法的有效性和准确性,可用于实际资料的处理,有较好的应用前景.

(3)深度域‘波场上延’法虽然能够解决地形复杂的地震资料成像难的问题,但还不能完全消除地表起伏和波场上延对地下复杂波场成像的影响,体现在成像剖面中同相轴局部发生错断和局部画弧现象.要解决这个问题,需提高深度域延拓算子对陡倾角和强横向变速的适应性,以及提高地表剧烈起伏变化地区的地震覆盖次数.

参考文献:

[1] 李振春.地震成像理论与方法[M].东营:石油大学出版社,2004.

[2] BERRYHILL John R. Wave-equation datuming[J]. Geophysics, 1979, 44(8):1329-1344.

[3] BERRYHILL John R. Wave-equation datuming, before stack[J]. Geophysics, 1984, 49(11):2064-2066.

[4] RESHEF M. Depth migration from irregular surfaces with the depth extrapolation method[J]. Geophysics, 1991, 56(1):119-122.

[5] BEASLEY C J, LYNN W. The zero velocity layer: migration from irregular surfaces[C]. Expanded Abstracts of 59th SEG Mtg, 1989:117.

[6] BEASLEY Lynn W. The zero velocity layer: migration from irregular surfaces[J]. Geophysics, 1992, 57(11):1435-1443.

[7] 何英,王华忠,等.复杂地形条件下波动方程叠前深度成像[J].勘探地球物理进展,2002,25(3):13-19.

HE Ying, WANG Hua-zhong, et al. Wave-equation pre-stack depth migration from complex topography[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2002, 25(3):13-19.

(编辑 刘艳荣)