

# 虚拟井约束地震反演方法 在台地斜坡带鲕滩储层预测中的应用 ——以四川盆地龙岗地区某单元为例

李梅<sup>1,2</sup>, 郝诚<sup>2</sup>, 张志让<sup>2</sup>, 詹路锋<sup>2</sup>, 潘以红<sup>2</sup>, 张健<sup>3</sup>, 彭勇<sup>3</sup>

(1 成都理工大学沉积地质研究院; 2 恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司; 3 中国石油西南油气田分公司)

**摘要** 目前的地震反演均是基于已钻井的地质信息,对无井或少井地区的地震储层预测仍然比较困难。采用叠前和叠后混合反演的办法,实现虚拟井约束地震反演,能弥补缺少钻井的缺陷。该方法充分利用了叠前反演分辨率高和叠后反演效率高、抗噪能力强的优点,运用遗传算法原理,在优选控制点处进行精细的叠前地震波形反演以构建虚拟井,然后以虚拟井作为约束信息进行叠后反演,能够达到储层预测的目的。对四川盆地龙岗地区无井台缘斜坡带鲕滩储层进行了应用尝试,预测效果较好。虚拟井约束地震反演方法对油气勘探初期少井或无井研究区的储层预测是行之有效的技术方法之一。

**关键词** 地震反演; 遗传算法; 虚拟井; 碳酸盐岩储层; 储层预测; 龙岗地区

**中图分类号**: TE112.23; P631.44

**文献标识码**: A

储层地震预测就是以地震信息为主要依据,综合利用地质、测井、岩石物理等信息作为约束条件,对油气储层的岩性、形态、物性和含油气性进行预测的一门专项技术。地震反演已经成为油气勘探中储层预测的主导技术<sup>[1-2]</sup>。

目前地震反演可分为叠前反演和叠后反演,无论哪种反演,均是基于已钻井的地质信息、利用测井资料垂向高分辨率和地震资料横向密集采样特点的综合约束反演技术,它们都能极大地提高波阻抗剖面的分辨率<sup>[3]</sup>。

本次研究区域位于海相台缘及其斜坡带内,区内已钻的井少且均位于台缘带,所钻鲕滩储层均为Ⅲ类,不具有优质储层的特点,台缘斜坡带无井控制,给地震反演储层预测带来较大困难。本次研究采用GMAX软件基于叠前和叠后混合反演的方法,基于遗传算法理论,在研究区优选控制点,进行精细的叠前地震波形反演以构建虚拟井,然后以虚拟井作为约束信息进行叠后反演,最终达到了储层预测的目的。

## 1 遗传算法简介

遗传算法(genetic algorithm,简称GA)是美国密歇根大学的John H. Holland在20世纪60年代提出的一种基于生物学中自然选择和遗传机理的随机搜索优化算法<sup>[4-5]</sup>。它是通过寻找反演结果与初始模型的最佳匹配,即寻优算法,对模型空间的参数进行编码,并用随机选择作为工具来引导搜索过程向着更高效的方向发展,是一种普适性的搜索方法。由于在搜索过程中使用了其父辈的适应度函数值作为启发知识,因此它又是一种启发式搜索方法。该方法计算简单、功能强大、易于实现、易于使用,具有隐含并行性和全局搜索能力等优点,且对很多优化问题能够较容易地得到令人满意的解<sup>[6-7]</sup>。

进入20世纪90年代,遗传算法迎来了兴盛发展时期,无论是理论研究还是应用研究都成了十分热门的课题。尤其是遗传算法的应用研究显得格外活跃,不但它的应用领域扩大,而且利用遗传算法进

收稿日期: 2012-03-19; 改回日期: 2012-06-26

基金项目: 本文受中国石油天然气股份有限公司物探攻关专项(编号2010-02-02)和国家自然科学基金项目“优质碳酸盐岩储层综合识别及预测方法研究”(编号40739903)资助

李梅: 女, 1968年生, 高级工程师, 2004年毕业于浙江大学, 获硕士学位; 现在成都理工大学沉积地质研究院攻读博士学位。主要从事油气地质综合评价研究。通讯地址: 100084 北京市海淀区农大南路1号硅谷亮城2A座七层 恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司; 电话: (010)82825231-8808

行优化和规则学习的能力也显著提高,同时产业应用方面的研究也在摸索之中<sup>[8]</sup>。此外,一些新的理论和方法在应用研究中亦得到了迅速的发展,这些无疑均给遗传算法增添了新的活力。

构建虚拟井曲线主要基于遗传算法理论,首先利

用叠前地震入射角道集和初始层速度场数据,在所选控制点上进行基于遗传算法的叠前波形反演,求取出控制点的纵波速度、横波速度和密度曲线,构建出虚拟井(图1),用于后续储层预测的地震反演约束控制<sup>[9]</sup>。虚拟井质量的好坏可通过层位标定进行质量控制。

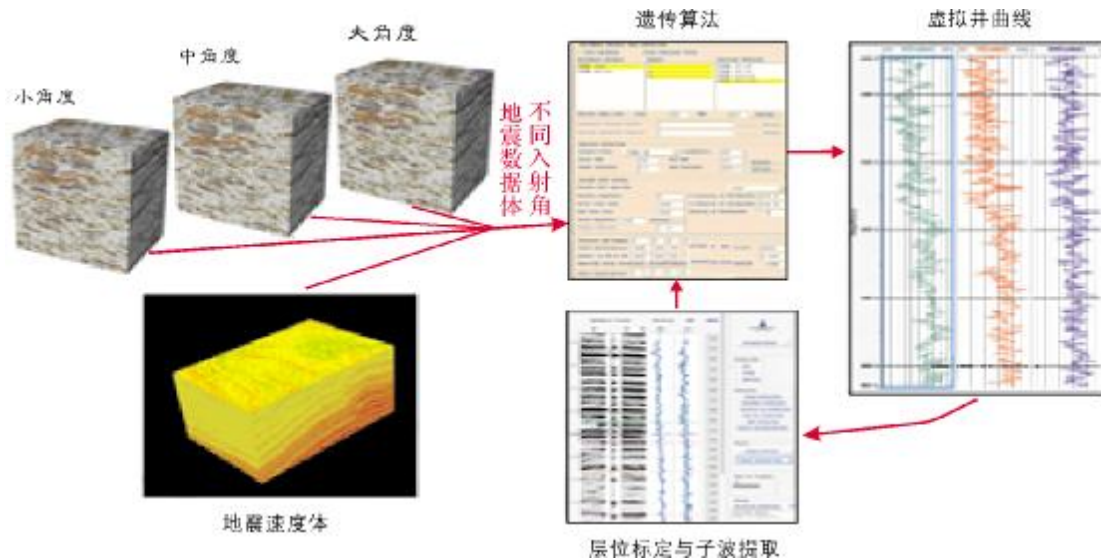


图1 虚拟井构建示意图

三条虚拟井曲线分别为纵波速度曲线、横波速度曲线及密度曲线

基于遗传算法构建虚拟井包括基础数据的准备、收敛函数的选取以及最终质量控制等三个重要组成部分,计算流程如图2所示。其中基础数据包括叠前入射角道集及原始地震层速度场。通过设定不同的迭代次数及误差控制率来进行叠前波形反演的反复迭代,最终通过相关系数的高低来判断虚拟井质量的好坏。

## 2 虚拟井约束地震反演方法

虚拟井约束地震反演是采用叠前和叠后混合反演的办法来实现的,技术路线如图3所示。首先利用前面所述的遗传算法在选取的控制点上构建出虚拟井的纵波速度、横波速度及密度曲线,由这些虚拟井点处的速度曲线,我们可以得到纵波时差及横波时差。然后对构建的虚拟井进行层位标定与子波提取,分别进行叠后反演与叠前反演。这里想强调指出的是,本次研究利用分形建模方法,克服了传统的线性建模所引起的地质模型过于线性的问题,使得反演结果更符合碳酸盐岩实际的地质特征,结果更真实可信。反演的最终结果可以得到纵波阻抗、横波阻抗及泊松比等弹性参数。

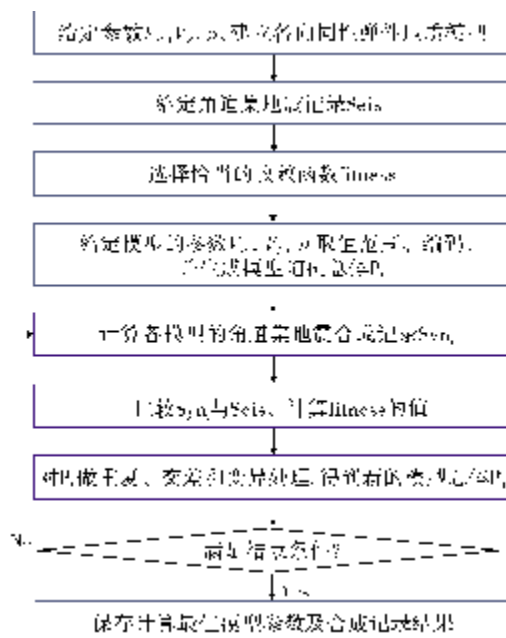


图2 基于遗传算法(GA)的虚拟井构建流程图

$P_0$  为给定初始  $V_p$ 、 $V_s$ 、 $\rho$  后生成的模型代号;  
 $P_1$  为对  $P_0$  做重复、交差和变异处理后所得的新的模型代号;  
 $Seis$  为实际地震记录

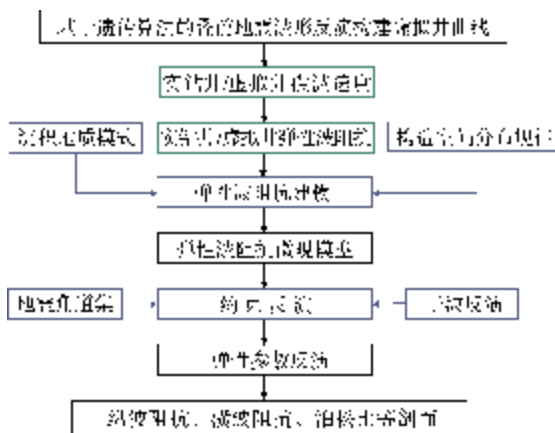


图3 虚拟井约束地震反演方法流程图

### 3 应用及效果分析

四川盆地是我国一个大型的油气富集区, 深层的海相碳酸盐岩储层为主要产层之一。龙岗构造带位于四川盆地东北部, 区内三叠系飞仙关组鲕粒滩储层在台缘相带及开阔台地内广泛分布, 储集空间类型主要为粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔及裂缝等。本次研究区主要包括龙岗构造带中的部分台缘及斜坡带, 共计 100 km<sup>2</sup>, 区内完钻井 2 口, 但均位于台缘带上, 这两口井钻遇了飞仙关组鲕粒滩Ⅲ类储层, 台缘斜坡带内无已钻井(图 4)。

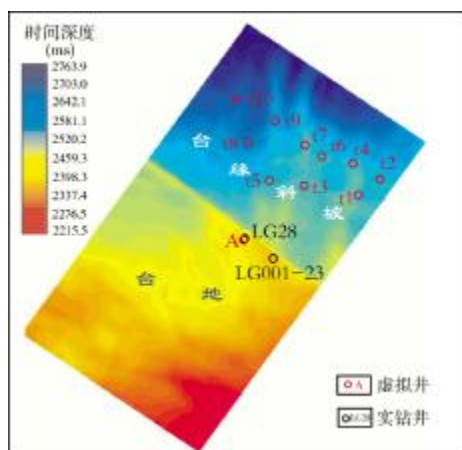


图4 四川龙岗地区某单元飞仙关组一段底部沉积相及实钻井与虚拟井分布图  
研究区左上角的深蓝色区域已过渡为海槽相

从图 4 中可以看到, 在整个研究区内只有台地边缘有两口实钻井, 很显然, 利用常规测井约束反演方法进行斜坡带鲕粒滩储层预测, 因缺少测井约束, 预

测结果会有很多不确定性, 这给研究区斜坡带的鲕粒滩储层预测带来了很大困难。

为了突破研究区钻井少的瓶颈, 笔者在斜坡相带内选取了 10 个控制点(图 4)进行虚拟井的构建, 并利用所得到的虚拟井纵波及横波速度, 进行井-震合成记录标定及子波提取, 以用于后续的叠后反演和叠前反演。经过后续的反演和分析, 认为用这一方法得到的波阻抗反演结果符合工区的构造、沉积和地层特点。本方法能够适应复杂地质模型的反演计算, 反演结果可靠, 适用范围广。本方法还同时具有较强的抗干扰能力, 能够适应含噪声的地震资料, 在实际应用中取得了明显的地质效果。

#### 3.1 虚拟井曲线构建

为了保证研究效果和虚拟井能够在平面上起到更好的控制作用, 井点位置的选取至关重要。本次虚拟井点的选取基于以下两个原则:

- (1) 虚拟井点在不同地质背景上具有一定的控制作用;
- (2) 虚拟井点处叠前道集地震资料品质相对较好。

本次研究在斜坡带及海槽一侧范围内优选了 10 个控制点, 构建虚拟井 10 口(图 4, 从 t1 至 t10)。虚拟井质量控制的手段主要是相关系数和井-震标定, 如果合成记录质量不好, 说明虚拟井的曲线构建较差, 需要修改参数重新提取, 直到相关系数较高且合成记录的波组关系对应较好为止。

为了验证本方法的可行性, 在实钻 LG28 井处重叠构建了一口虚拟 A 井。图 5 是地震波形叠前反演得到的虚拟 A 井与实钻 LG28 井的 P 波曲线对比图。从两井曲线对比可以看出, 通过叠前波形反演得到的虚拟 A 井 P 波速度曲线趋势与实钻井中实测的 P 波速度曲线趋势相吻合, 因此认为本文所采用的方法是可行的, 所构建的其他 10 口虚拟井曲线是可靠的。

图 6 是虚拟 A 井与实钻 LG28 井的合成记录对比图, 它们的时深关系基本一致, 虚拟井的合成记录与实际地震标定效果良好, 特征明显, 相关系数高, 且虚拟井与实钻井的低频趋势吻合度较高, 整体上反映出虚拟井曲线构建比较好, 可靠程度较高。

#### 3.2 虚拟井约束波阻抗反演及效果分析

利用在斜坡带上构建的 10 口虚拟井和在台缘



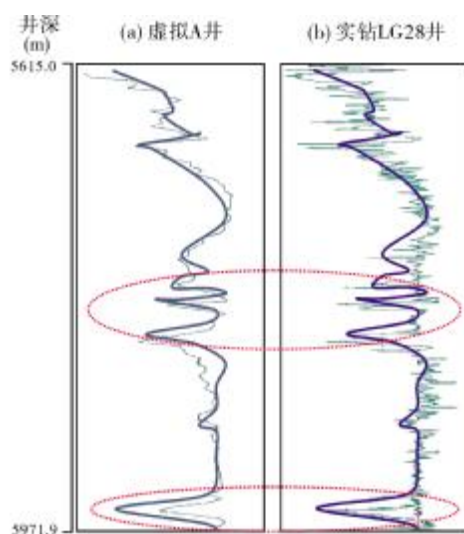
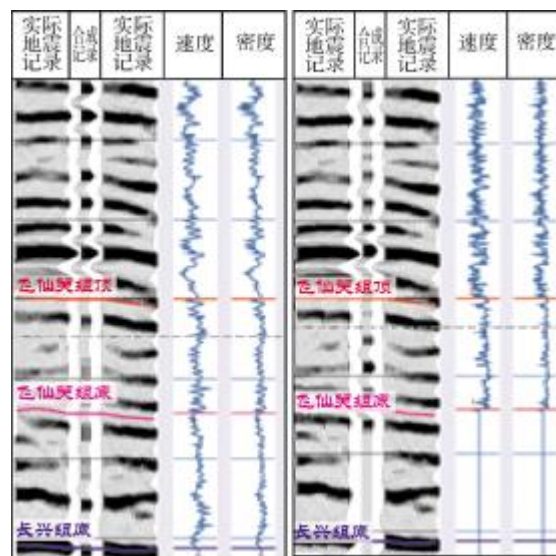


图 5 基于遗传算法的叠前地震波形反演构建的虚拟井与实钻井的 P 波速度曲线对比  
上下两处粉红色椭圆区域代表储层段



(a) 虚拟A井 (b) 实钻LG28井  
图 6 虚拟 A 井与实钻 LG28 井合成记录对比

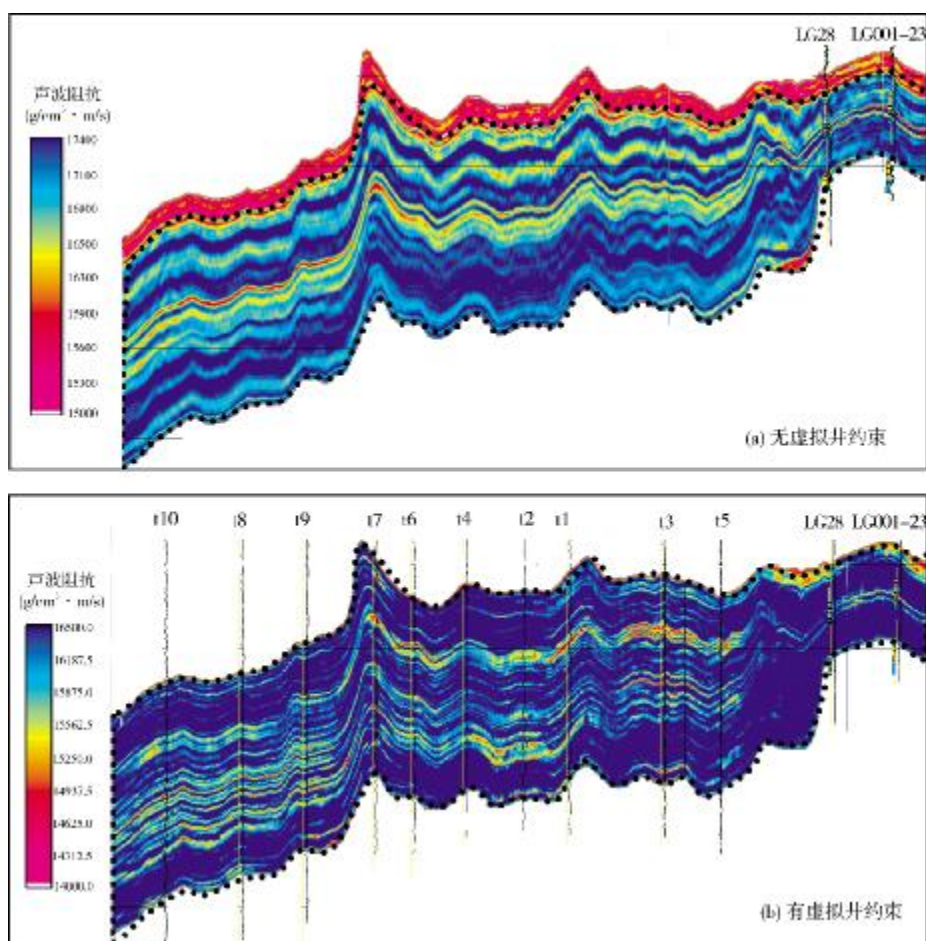


图 7 有无虚拟井约束的反演联井剖面效果对比  
两个剖面的连线位置完全相同;虚线范围内的低阻抗(暖色调)区域反映储层分布

带所钻的 2 口实钻井作为模型及反演的约束条件,参与工区地震反演中,可用以充分挖掘地震信息,精细刻画储层纵横向展布特征。图 7a 是只有两口实钻井而没有利用虚拟井参与约束的反演结果,图 7b 是同时利用了 10 口虚拟井约束的反演结果。对比可见,同时利用虚拟井进行约束的反演结果比只有实际钻井约束的结果在纵向上具有更高的分辨率,且在有实钻井的地方与实钻井井中实测结果吻合得很好,储层(图中暖色调区域)刻画清晰,效果比较明显。

从上面的实际使用效果可见,构建的虚拟井曲线对鲕粒滩储层有很好的响应,反演的结果(图 8)能够很好地反映鲕粒滩储层的分布,因此认为本文所述的虚拟井约束反演是低密度钻井或无钻井研究区高分辨率储层预测的有效方法。

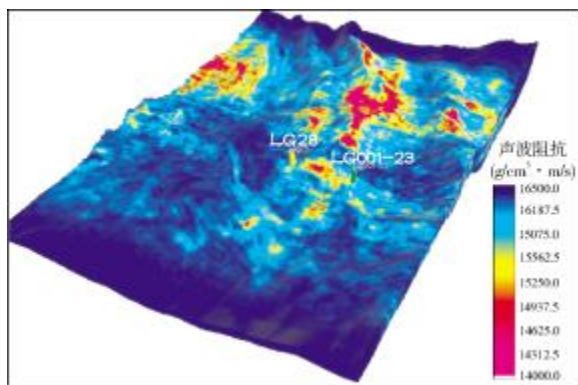


图 8 四川盆地龙岗某区虚拟井约束地震反演预测  
鲕滩储层平面分布图  
低阻抗(暖色调)区域反映储层分布

## 4 结 论

(1) 虚拟井约束地震反演是一种叠前和叠后混合反演的方法,它首先利用叠前波形反演构建出虚拟井,构建虚拟井曲线主要基于遗传算法理论。

(2) 以虚拟井作为约束条件来进行叠后波阻抗反演,纵向分辨率可以得到较大提高。

(3) 虚拟井约束地震反演,为无井或少井地区的储层预测提供了一种切实可行的选择,预测结果可靠性较高。

### 参 考 文 献

- [1] 张永刚. 地震波阻抗反演技术的现状和发展[J]. 石油物探, 2002, 41(4):385-390.
- [2] 杨立强. 测井约束地震反演综述[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3):530-531.
- [3] 李晶, 陈裕明, 唐湘蓉. 用退火遗传算法进行地震波阻抗反演[J]. 石油物探, 2004, 43(3):234-237.
- [4] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Michigan: Univ. of Michigan Press, 1975.
- [5] Bagley J D. The behavior of adaptive system which employ genetic and correlation algorithm[J]. Dissertation Abstracts International, 1967, 28(12):2-4.
- [6] 王宝珍, 杨文采. 用改进的遗传算法进行地震波阻抗反演研究[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(2):678-681.
- [7] 成琥, 赵宪生, 王红霞, 等. 基于 BP 网络和遗传算法的波阻抗混合反演[J]. 石油物探, 2006, 45(6):574-579.
- [8] 罗文造, 杨绍国, 王英民. 基于遗传算法的叠前地震波形反演构建虚拟井曲线[J]. 南海地质研究, 2006, 1(3): 121-127.

编辑:吴厚松

## Application of Virtual-well Constrained Seismic Inversion in Prediction of Oolitic Shoal Reservoirs in Platform Slope Zone: A Case of Application in Longgang Area, Sichuan Basin

Li Mei, Xi Cheng, Zhang Zhirang, Zhan Lufeng, Pan Yihong, Zhang Jian, Peng Yong

**Abstract:** The seismic inversion in present is all based on the geology information from drilled wells but the seismic prediction of reservoirs is still difficult in those areas where no or less wells drilled. The use of the inversion of mixing pre-stack with post-stack to realize the inversion with virtual wells can solve the problem of less well information. This method takes full advantage of high resolution in pre-stack inversion with high efficiency and high anti-noise ability in post-stack inversion. By principle of genetic algorithm, the way that fine pre-stack full-wave inversion can be done at selected control points to construct virtual wells and then these virtual wells as restricting information are applied in post-stack impedance inversion can realize the reservoir prediction. By this way, the mixing seismic inversion is well practised to the oolitic reservoirs without wells in the slope belt in Longgang area, Sichuan Basin. It is proved that the technology of virtual-well constrained seismic inversion is effective to predict reservoirs in immature areas without drilled wells.

**Key words:** Seismic inversion; Genetic algorithm; Virtual well; Carbonate reservoir; Reservoir prediction; Longgang area; Sichuan Basin

Li Mei: female, Senior Geology Engineer, Ph.D. degree in progress at Sedimentary Geology Research Institute of Chengdu Technology University. Add: Land Ocean Energy Services Co., Ltd., 1 Nongda Nan Rd., Beijing, 100084, China