

文章编号:1673-5005(2007)04-0024-06

油气储层识别软件的研制

张 璐¹, 印兴耀¹, 翁 斌²

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中海油石油研究中心 勘探研究部, 北京 100027)

摘要:基于软件工程理论,结合计算机软件技术和油气储层识别技术,选用 Motif 作为开发平台,研制了 Unix 操作系统下的油气储层识别软件。针对大型物探软件的特点,采用结构化的文件系统进行数据管理,引入全 PlugIns 概念合理设计系统架构,确保了软件质量,有效地延长了软件的生命周期。在软件的编制过程中,整合了地震属性提取及优化、BP 神经网络、SOM 聚类分析、叠后波阻抗和叠前弹性反演等油气储层识别的先进技术,建立了油气储层判别工作流程。此软件已应用于实际地区,并取得了良好的应用效果。同时该软件也为其他技术的集成提供了一个基础平台。

关键词:储层识别;软件工程;地震属性;叠前/叠后反演

中图分类号:P631.443

文献标识码:A

Development of oil and gas reservoir identification system

ZHANG Lu¹, YIN Xing-yao¹, WENG Bin²

(1. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Exploration Research Department of CNOOC Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: Combined reservoir identification technology with computer science technology, the software named oil and gas reservoir identification system was developed on the basis of the thinking of software engineering by using Motif as the platform under Unix system. Considering the characteristics of large-scale geophysical prospecting software, the filing system was adopted to manage the data, the concept of entire PlugIns was introduced for designing the reasonable construction of the software, through which the quality of the system can be guaranteed and its lifecycle can be extended. This system establishes the work flow of discriminating the oil and gas reservoir tentatively. This system consists of some advanced technologies of reservoir identification, such as seismic attribute extraction and optimization, BP network, SOM clustering analysis, post-stack and pre-stack inversion, and offers a foundation platform for integrating other geophysical technologies. Good effect was obtained in practical application.

Key words: reservoir identification; software engineering; seismic attribution; pre/post-stack inversion.

目前,在石油地质勘探领域中,对油气储层进行横向预测及含油气评价的方法技术已经有了长足的发展,其主要手段是依靠地震信息,将基于地震属性的人工神经网络和聚类分析技术与基于岩石物理分析的叠后和叠前反演技术相结合,建立了地质参数与地震信息之间的联系^[1-6]。油气储层识别系统作为国内研制的油气储层识别技术的载体,是一套较为完备的、能相对独立地完成储层预测及天然气地震识别工作的开发应用平台,且具有自主知识产权。

笔者就如何开发油气储层识别软件进行系统分析,并介绍已经取得的成果。

1 油气储层识别软件设计

1.1 油气储层识别软件的整体结构

1.1.1 油气储层识别软件体系结构

软件体系结构是影响一件产品内在质量的核心因素^[7-9]。对于油气勘探领域的软件开发而言,由于其庞大的数据体、繁杂的处理流程、迅速发展的技术

收稿日期:2007-03-08

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2002AA614010)

作者简介:张璐(1983-),女(汉族),湖北武汉人,博士研究生,主要从事物探方法研究。

以及巨大的计算量,对软件产品的灵活性、稳定性、高效性、可继承性及维护性有格外严格的要求,因而其体系结构的设计也显得尤为重要。

软件体系结构应满足 3 个特点:① 软件系统结构是一个高层次上的抽象,它并不涉及具体的系统结构;② 软件体系结构必须支持系统所要求的功能,在设计软件体系结构时,必须考虑系统的动态行为;③ 在设计软件体系结构时,必须考虑现有系统的兼容性、安全性和可靠性,同时还要考虑系统以后的扩展性和伸缩性。因此,必须在多个不同方向的目标中进行决策。基于上述特征,借鉴 NIST/ECMA 的框架参考模型,结合油气储藏层识别的特点,本软件系统采用用户界面、作业管理、功能模块和数据存储 4 层体系架构^[10]。

用户界面层将用户界面集成为一个用户主控制台,包括用于各图形界面、工区信息“底图”图形界面等;作业管理层提供工区管理和对各应用功能模块的管理和驱动,实现对一系列模块序列处理流程、模块数据的获取及传递和交互分析模块的协同工作的控制;功能模块层包含基础模块和油气储层识别相关技术模块,应用功能模块是可插入的工具,允许在运行过程中动态加载,基础模块可以被许多功能模块调用,如地震测线坐标,工区信息等;数据存储层支持结构化数据文件系统的的功能管理和互操作,包含数据结构、数据目录管理和存取控制能力。

1.1.2 油气储层识别软件框架

一个大型的地震软件系统只有及时扩充其核心技术才能够有效地延长其生命周期。因而本文中采用了新型的全 PlugIns 架构。PlugIn 技术是指将软件模块插入应用框架中去,以扩充系统功能。每个 PlugIn 是单独编译的、针对定义接口编写的程序,它可以动态地连接到某个框架而不需要重新编译框架程序。现代操作系统具备动态加载库到运行程序的途径,为 PlugIn 技术的实现提供前提。利用此技术在增加新功能的同时,不需要修改已经有的部分,因为它有完全确定的接口并执行非常具体的功能,并易于维护^[11-12]。基于此思想设计出的软件框架如图 1。

油气储层识别软件的总体设计思想是由基础软件平台负责管理整个软件系统,其余各集成子系统通过数据流以文件管理方式挂接在基础软件子系统中。利用基础软件子系统提供的环境和工具实现各自的地震解释功能及其他相关的功能。基础软件子系统确定整个软件的框架设计,其他各子系统与基

础软件子系统一起进行详细设计。在统一的详细设计基础上,分别开发各个子系统,在开发过程中互相协调,最终形成此系统。

油气储层识别系统基础软件平台模块结构见图2。

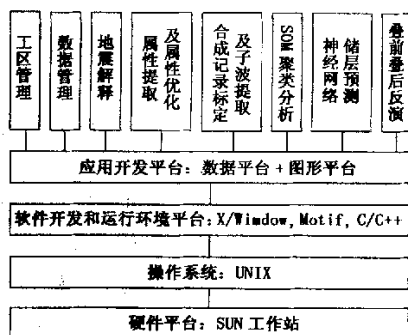


图1 软/硬件系统关系

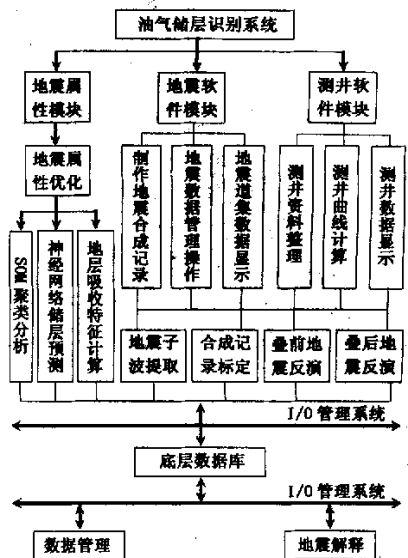


图2 软件应用模块结构

1.2 油气储层识别软件开发工具

国际石油技术开放标准协会 (POSC) 提出的软件集成平台 (SIP) 是应用程序与其运行环境 (数据、用户、系统软件和通信) 的接口。本软件系统采用 X/Open 体系结构框架, 符合 POSC 标准。对于软件集成平台的选择主要基于以下原则: 足够强的功能, 实际处理的可行性, 后期的可维护性。系统完全建立在开放软件基础上, 采用开放式软件开发环境, 独立开发一些底层库, 拥有全部系统源代码, 不依赖于其他商业软件, 拥有自主的知识产权, 且便于在 Unix/Risc Sun 工作站系统上移植。

2 油气储层识别软件主要功能及技术

本系统集成基于非平稳信号理论的地震属性提取与属性优化方法、神经网络预测和聚类分析的油气藏预测方法;首次研制了基于遗传算法的叠前地震道集弹性波形反演和基于多角度地震道集的叠后弹性阻抗反演、计算地球介质的岩石物性参数软件,用于储层的油气检测。

2.1 基础功能模块

(1)工区及数据管理。工区管理模块完成用户工区建立、删除、修改和工区测网图显示等操作;数据管理模块实现工区数据及其相关地震数据的创建、修改、保存、删除和恢复等操作,负责本系统数据加载和数据输出,主要功能有二维与三维地震数据加载(纵测线、横测线和时间切片生成)、测井数据加载(加载井头文件和井曲线)、观测系统数据生成。软件中还包含了CGM出图、测网底图显示、等值线绘图等配套功能。

(2)地震解释及图形显示。油气储层识别软件实现了利用二维或三维的地震资料进行平剖面解释的相关功能,包含了解释和显示两个基本部分。在显示方面,除了一般的地震剖面显示之外,还具有任意线剖面、时间切片剖面及井曲线投影等显示手段。在各种显示剖面上能够完成层位和断层的拾取、编辑等交互解释的工作和层位的自动追踪解释。

(3)合成地震记录标定及子波提取。合成地震记录是地震资料解释中的一项基本工作,也是联系地震资料和测井资料的桥梁。此模块包含有井旁地震道的频谱分析、子波生成、合成地震记录制作、测井地震层位标定、时-深转换等功能,能将井信息与井旁地震道数据有机地结合起来进行地层标定。

制作合成地震记录时必须准确定出地震子波,地震子波对标定的准确与否起着很大的作用。子波提取步骤为:首先使用井旁地震道提取零相位地震子波;然后结合测井资料确定出子波的常相位,得到常相位子波,并以此为依据进行初步标定;最后在此基础上,以常相位子波为初始子波,综合井旁地震道和测井资料迭代求取精细子波。

2.2 地震属性提取及优化

目前在地震属性研究中,傅里叶变换和功率谱估计是核心技术之一。实际地震资料的频率成分是随着时间的变化而改变的,即地震信号是非平稳信号。传统的傅里叶变换后信号的时间信息在频域是很难得到的,得到的频谱只是显示任一频率包含在

信号中的总强度,它很难提供有关谱分量的时间域信息。基于非平稳信号理论分析,将整体频谱推广到局部频率的概念上,把谱能量的变化看作是时间和频率的函数。对地震信号时频分析中变换核函数的研究,可提取出基于非平稳信号理论的地震属性。在研究联合时频分布多种核函数的基础上,针对实际信号的特点,采用不同的核对地震信号进行分析,能更好地反映局部的地震属性特征,其精度高,对于储层薄、横向变化大的地区更为有利^[13]。

利用属性提取模块可以沿层(或层间)在时间域(或深度域)内提取4类(地震剖面属性、地震层位属性、地震层间属性和地震时频属性)共几十种不同的地震属性;然后根据地质任务的需要,利用属性优化模块对提取的属性进行属性优选和分类;最后采用模式识别或神经网络技术进行地震属性与储层或油层的相关性分析,分析储层或油层的展布特征和物性特征,或直接进行烃类检测。

2.3 神经网络储层预测及聚类分析

无论采用传统的模式识别方法还是采用神经网络方法,利用地震资料进行储层预测,都需要进行地震属性参数的提取。神经网络储层预测的基本特征量为属性模块所提供的4大类20种属性参数。

神经网络油气模式识别技术是综合利用地震属性进行油气预测的技术之一。首先通过计算获得多种地震属性,利用属性优化模块进行综合分析,找出对储层油气比较敏感的地震属性组合;然后收集油气井与非油气井的井旁道地震属性,组成学习样本并进行神经网络学习;最后利用学习结果对储层进行油气预测。神经网络储层预测分为BP神经网络和SDM聚类分析两种。

2.3.1 BP神经网络

BP网络的主要思想是从后向前(反向过程)逐层传播输出层的误差,以间接算出隐层误差。算法分为两个阶段:第一阶段(正向过程)输入信息从输入层经隐层逐层计算各单元的输出值;第二阶段(反向传播过程)内输出误差逐层向前算出隐层各单元的误差,并用此误差修正前层权值。在反向传播算法中通常采用梯度法修正权值,为此要求输出函数可微,通常采用Sigmoid函数作为输出函数。该网络由分为不同层次的节点集合组成,每一层的节点输出送到下一层节点,这些输出值由于连接权值不同而被放大、衰减或抑制。除了输出层外,每一节点的输入为前一层所有节点输出值的加权和,每一节点的输出值由节点输出激励函数和偏置量决定

(算法流程如图3所示)^[14-15]。根据属性优化的结果,选用层属性中的平均能量、最大波峰值、最小波谷值、瞬时相位和瞬时振幅5种属性进行BP神经网络训练和判别。

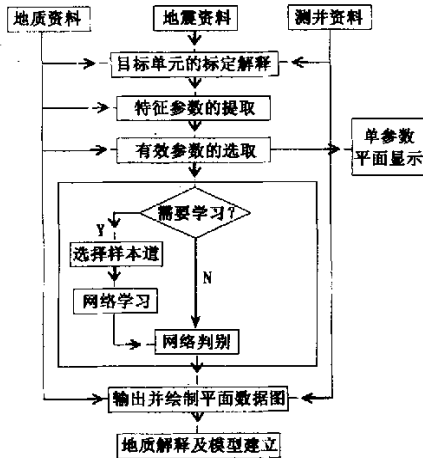


图3 BP神经网络流程图

2.3.2 SOM 聚类分析

SOM(self organizing networks map)自组织神经网络是一种无监督(无导师)自组织自学习网络,可以实现对输入模式的特征进行拓扑逻辑映射,它由若干输入节点和输出节点组成,每个输出节点通过可变连接权与所有输入节点相连,且输出节点间存在局部相互连接。这种网络将输入样本映射到输出层上,可形成特征图。

SOM 网络自组织映射的基本原理是:当以某类模式输入时,其输出层某一节点得到最大刺激而获胜,同时该获胜节点周围一些节点因侧向相互作用也受到较大的刺激。这时,与这些节点连接的权值矢量向输入模式的方向作相应的修正。当输入模式类别发生变化时,二维平面上的获胜节点也从原来的节点移到其他节点上。这样,网络通过自组织方式用大量的训练样本数据来调整网络的权值,最后使得网络输出层特征图能够反映样本数据的分布情况。因此,根据 SOM 网络的输出状况,不但能判断输入模式所属的类别,并使输出节点代表某一类模式,还能够得到整个区域的大体分布情况^[16]。根据属性优化的结果,选用沿层位提取的瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率、自相关函数的极大值与极小值之比和正交波5种属性。

2.4 叠前和叠后反演

地震反演、储层或油气藏描述软件的功能是在地质框架的控制和测井资料(声测井)的约束下进

行地震反演的,并利用反演声阻抗实现储层或油气藏定量描述和直接进行碳氢化合物检测。为了从纵波反射中估算出地层的弹性属性,利用叠后弹性波阻抗反演技术,先是在模拟的测井曲线约束下转化为一定范围的角度道,再抽取所需的叠前弹性参数。

2.4.1 叠后弹性波阻抗反演

众所周知,地震波垂直入射时,利用褶积模型 $S(t) = R(t) * W(t)$ 反演;对于与角度相关的数据,褶积模型变成: $S(\theta) = R(\theta) * W(\theta)$ 。其中, $S(t)$ 为地震道; $R(t)$ 为反射系数; $W(t)$ 为子波; $S(\theta)$ 为角度地震道; $R(\theta)$ 是角度反射系数,它通过测井的纵、横波速度和密度,由 Zoeppritz 方程计算得到; $W(\theta)$ 是角度子波^[17],它通过反射系数和角度地震道而得到。角度反射系数可用来计算弹性波阻抗(elastic impedance, EI)。弹性波阻抗 EI 并不是一个可以进行物理测量的属性,它是一个通过推导而得出的用来解释地震数据的属性。

弹性波阻抗反演的基本流程如下^[18]:

(1) 计算井旁道 EI 曲线,这些曲线的角度是相对于储层位置的地震数据来讲的,对于同一个 CMP 道集来说, EI 是角度的函数。井旁道 EI 曲线的计算需要提取井中的纵、横波速度及密度信息,这些信息由弹性波方程反演得到。

(2) 将偏移距数据转化为角道集数据(可以用炮检距部分叠加代替)。

(3) 估算每个角度数据所对应的角度子波,利用与叠后反演相类似的反演算法计算出各个角度的弹性波阻抗剖面。

2.4.2 基于遗传算法的叠前弹性波波形反演技术

由于叠前数据包含了丰富的振幅和旅行时信息,因此叠前反演会得到比叠后反演更加详细的地层信息。叠前弹性波反演的目标是获得岩石的密度、纵波速度和横波速度。首先利用弹性波动方程建立起地震波传播的正演过程,然后利用遗传算法进行叠前弹性波反演。该算法先利用模型参数的先验信息和某种正演机制来计算叠前合成地震道集数据,再将合成道集和实际观测的 CMP 道集进行比较,根据两者的匹配程度得到能够最佳描述本地区地质情况的模型,以进一步对地层岩性作精确预测^[3-5,18]。

此软件在利用已有常规技术(高分辨率的地震采集技术,多次波压制技术,叠前保幅偏移技术)的基础上,以反演和预测技术(岩石物理分析,储层反演技术,气藏判别技术)作为油气储层判别技术体系的核心,以地震技术多解性的研究(区域地质研

究,构造分析,成藏条件分析,沉积相分析)作为综合评价方法,建立油气藏勘探流程(图4)。

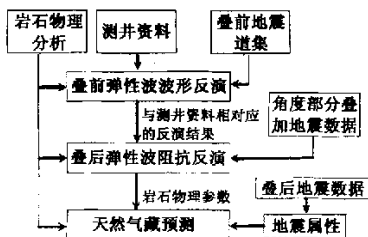


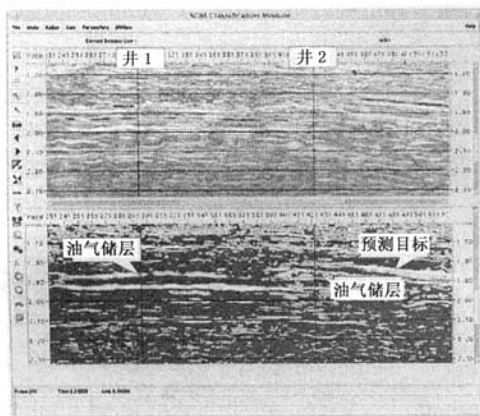
图4 叠前、叠后油气藏勘探反演流程

3 实际资料测试及效果分析

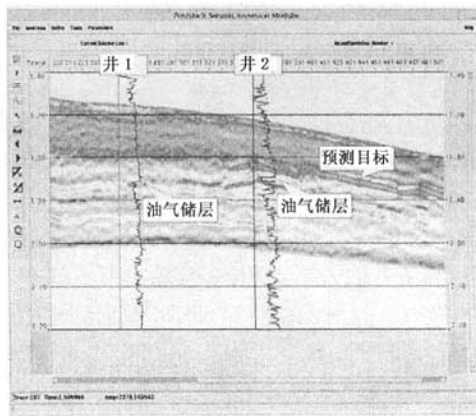
油气藏储层识别软件已应用于某实际区域进行储层识别及预测。从图5(a)地震多属性聚类储层预测的结果和图5(b)密度反演结果上看,地震多属性聚类结果反映出与该区油气藏一气组储层的近似情

况,井1和井2的气层具有相似表现,经实际钻井证明了它们都是砂岩单层厚度在15 m以上的扇三角洲前缘水下分流河道储层类型。在井旁油气藏附近的预测目标,应该是与两口井类似的储层类型。通过岩石测井地球物理分析,认为在此区域各种粒度的非含钙纯净储层的测井体积密度都比周围的泥质岩的小,密度剖面显示在地震多属性聚类结果指示储层的位置上,密度处理数据同样存在相对低值,表明是非含钙纯净储层,钻井数据与其相吻合。在井1油气藏附近的预测目标,其岩性、物性应与井2气层相当或更好。研究表明,在此区域地震多属性分析与地震弹性波阻抗技术都是有效的储层预测技术,说明应用此软件对预测目标所做的储层预测结果是可信的。

叠前弹性参数反演和神经网络天然气预测结果见图6。

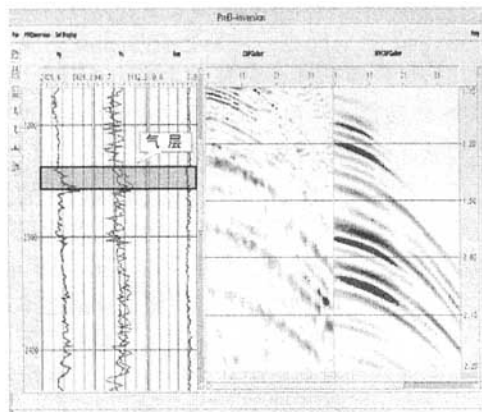


(a) SOM地震属性聚类结果

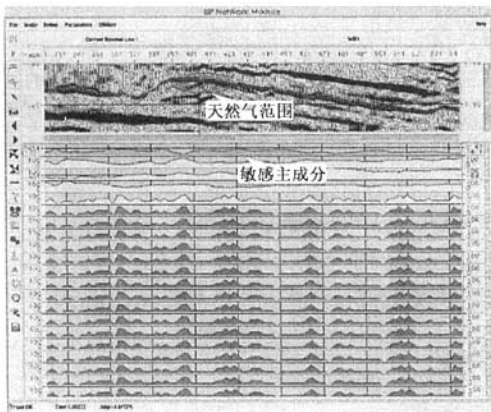


(b) 密度反演结果

图5 聚类储层预测和密度反演应用结果



(a) 地震叠前弹性参数反演结果



(b) 神经网络天然气预测结果

图6 叠前弹性参数反演和神经网络天然气预测结果

在油气地震检测方面,从地震叠前全波形弹性参数反演得到的泊松比结果看到,井1气层的泊松比较之周围的泥岩和含水砂岩来说是最小的(图6(a))。经已知井油气信息约束下的地震属性主成分分析降维后得到的主成分参数,通过神经网络技术处理能够指示出含气储层富含天然气的具体位置(图6(b))。

此软件在实际油气藏区域及其附近预测目标上的应用,预测结果符合气藏的实际情况,充分检验了该系统在方法和技术上是有效的,验证了油气储层识别软件系统的实用性。

4 结束语

油气储层识别系统是集软件工程、物探技术、数学方法和油藏描述为一体的综合性科研成果,是我国具有自主知识产权的软件系统,具有较大的实际应用价值。此系统集成如非平稳信号理论下的联合时频分布属性、SOM 聚类分析方法、弹性波阻抗反演和基于遗传算法的叠前波形反演等多项具有业内领先或创新的储层预测及油气藏地震识别技术,技术含量高。此系统不仅仅是单项先进技术的集合体,更重要的是它为地震识别提供了完整的解决方案、反演流程及属性分析技术流程,在实际应用中取得了良好的应用效果,实现了科研成果的产业化。

参考文献:

- [1] 张繁昌,印兴耀,吴国忱,等.用模拟退火神经网络技术进行波阻抗反演[J].石油大学学报:自然科学版,1997,21(6):16-18.
ZHANG Fan-chang, YIN Xing-yao, WU Guo-chen, et al. Impedance inversion by using annealing neural network [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997, 21(6): 16-18.
- [2] 张繁昌,印兴耀,吴国忱,等.一种用于地层速度外推的退火神经网络法[J].石油物探,1997,36(增刊):79-83.
ZHANG Fan-chang, YIN Xing-yao, WU Guo-chen, et al. A anneal neural network method applied in extrapolating the velocity of the stratum [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1997, 36(sup): 79-83.
- [3] 张繁昌,印兴耀.一种叠前地震记录的全波场正反演方法[J].石油物探,2004,43(3):217-222.
ZHANG Fan-chang, YIN Xing-yao. A full wave field forward modeling and inversion method for prestack seismo-gram [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(3): 217-222.
- [4] 张繁昌,印兴耀.层状半空间叠前地震记录的波动方程正演模拟[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):25-29.
ZHANG Fan-chang, YIN Xing-yao. Wave equation forward modeling of prestack seismo-gram in a stratified half space [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 25-29.
- [5] 张繁昌,印兴耀.层状半空间地震数据的弹性波方程反演[J].石油地球物理勘探,2005,40(5):523-529.
ZHANG Fan-chang, YIN Xing-yao. Elastic wave equation inversion of seismic data in layered half-space [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(5): 523-529.
- [6] MA X Q. Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing [J]. Geophysics, 2002, 67(6): 1877-1885.
- [7] 杨美清.软件工程技术发展思索[J].软件学报,2005,16(1):1-7.
YANG Fu-qing. Thinking on the development of software engineering technology [J]. Journal of Software, 2005, 16(1): 1-7.
- [8] 王宏琳.物探软件技术进步与《石油地球物理勘探》[J].石油地球物理勘探,2004,40(2):136-137.
WANG Hong-lin. The relationship between the improvement of technology of geophysical software and OGP [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 40(2): 136-137.
- [9] 牟善林,刘超颖.超大型勘探软件开发项目的管理方法与实践[J].石油科技论坛,2005,6:61-66.
MU Shan-lin, LIU Chao-ying. The management and practice of developing the large-scale seismic software [J]. Oil Forum, 2005, 6: 61-66.
- [10] 王宏琳.地震软件技术——勘探地球物理计算机软件开发[M].北京:石油工业出版社,2005.
- [11] 徐维秀,萧蕴诗,谭绍泉,等.基于地理信息系统的地震采集工程数据可视化管理平台的设计[J].石油物探,2005,44(4):357-361.
XU Wei-xiu, XIAO Yun-shi, TAN Shao-quan, et al. Visual data management platform design for seismic acquisition engineering [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(4): 351-361.
- [12] BEASLEY C J. Beyond the "more data, faster computer" syndrome [J]. The Leading Edge, 2003, 22(2): 152-154.
- [13] 印兴耀,张奎,张广智.联合时频分布及其属性的应用[J].石油地球物理勘探,2003,38(5):522-526.
YIN Xing-yao, ZHANG Kui, ZHANG Guang-zhi. Institute of oil geophysical prospecting [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(5): 522-526.

(下转第45页)

- neous objects in planarly layered media [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2003, 51(9): 2393-2401.
- [3] XU X M, LIU Q H. The BCGS-FFT method for electromagnetic scattering from inhomogeneous objects in a planarly layered medium [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagat Lett, 2002, 1(1): 77-80.
- [4] WANG Y M, CHEW W C. An iterative solution of the two-dimensional electromagnetic inverse scattering problem [J]. Int J Imaging Syst Tech, 1989, 1(1): 100-108.
- [5] CHEW W C, WANG Y M. Reconstruction of two-dimensional permittivity distribution using the distorted Born iterative method [J]. IEEE Trans Med Imag, 1990, 9(3): 218-225.
- [6] LI F H, LIU Q H, SONG L P. Three-dimensional reconstruction of objects buried in layered media using Born and distorted Born iterative methods [J]. IEEE Geosci Remote Sensing Letters, 2004, 1(2): 107-111.
- [7] van den BERG P M, KLEINMAN R E. A contrast source inversion method [J]. Inverse Problems, 1997, 13: 1607-1620.
- [8] van den BERG P M, van BROEKHOVEN A L, ABUBAKAR A. Extended contrast source inversion [J]. Inverse Problems, 1999, 15: 1325-1344.
- [9] ZWAMBORN A P M, van den BERG P M. The three-dimensional weak form of the conjugate gradient FFT method for solving scattering problems [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Tech, 1992, 40(9): 1757-1766.
- [10] MICHALSKI K A, ZHENG D. Electromagnetic scattering and radiation by surface of arbitrary shape in layered media, part I: theory [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1990, 38(2): 335-344.
- [11] ZHANG Z Q, LIU Q H. Three-dimensional nonlinear image reconstruction for microwave biomedical imaging [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2004, 51(3): 544-548.
- [12] SONG L P, LIU Q H, LI F H, et al. Reconstruction of three-dimensional objects in layered media: numerical experiments [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2005, 53(6): 1556-1561.

(编辑 修荣荣)

(上接第29页)

- [14] 印兴耀, 杨凤丽, 吴国忱. 神经网络在 CB 油田储层预测和储层厚度计算中的应用 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(2): 17-20.
- YIN Xing-yao, YANG Feng-li, WU Guo-chen. Application of neural network to predicting reservoir and calculating thickness in CB Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998, 22(2): 17-20.
- [15] 印兴耀, 吴国忱, 张洪宙. 神经网络在储层横向预测中的应用 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(5): 20-26.
- YIN Xing-yao, WU Guo-chen, ZHANG Hong-zhou. The application of neural networks in the reservoir prediction [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994, 18(5): 20-26.
- [16] 印兴耀, 周静毅. 地震属性优化方法综述 [J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 482-489.
- YIN Xing-yao, ZHOU Jing-yi. Summary of optimum methods of seismic attributes [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(4): 482-489.
- [17] 张广智, 刘洪, 印兴耀. 井旁道地震子波精细提取方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(2): 158-162.
- ZHANG Guang-zhi, LIU Hong, YIN Xing-yao. Method for fine picking up seismic wavelet at uphole trace [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(2): 158-162.
- [18] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 弹性阻抗反演及应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 89-92.
- WANG Bao-li, YIN Xing-yao, ZHANG Fan-chang. Elastic impedance inversion and its application [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 89-92.

(编辑 刘艳荣)