

中国石油天然气集团公司

第三届测井新技术交流会论文集



石油工业出版社

中国石油天然气集团公司
第三届测井新技术交流会论文集

中国石油天然气集团公司科技发展部 编

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国石油天然气集团公司第三届测井新技术交流会论文集 / 中国石油
天然气集团公司科技发展部编.

北京: 石油工业出版社, 2007.10

ISBN 978-7-5021-6236-8

I. 中…

II. 中…

III. 油气测井-学术会议-文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 154072 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 河北天普润印刷厂

2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 20.75

字数: 526 千字 印数: 1—2000 册

定价: 80.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

为了总结和交流近年来测井技术研究和应用成果,提高测井技术能力和水平,加快科研新成果转化应用,并组织做好中国石油天然气集团公司第三届测井新技术交流会论文交流工作,中国石油天然气集团公司科技发展部组织编辑出版了本论文集。

通过对集团公司所属单位及石油院校的论文征集,收到推荐论文90篇,经专家评选出49篇优秀论文收录本论文集。主要包括自主研发的测井新方法、新产品、新工艺、新技术,测井新技术应用效果分析及新技术可行性研究等内容。

本文集的出版得到了中国石油天然气集团公司科技发展部刘振武主任、孙宁副主任的大力支持和指导;科技发展部赵明副总工程师、金鼎高工,大庆石油管理局测井公司陶宏根教授级高工、王宏建高工负责组织协调和全书的审定工作。此外,还特邀了石油大学(北京)冯启宁教授、鞠晓东教授、毛志强教授,集团公司咨询中心吴铭德教授、刘凤惠高工;中油集团测井有限公司王敬农教授级高工、李长文高工、杨林高工等测井技术专家、学者对入选论文进行了认真的审查和修改;大庆石油管理局于跃高工、赵平高工等同志在文集的出版中做了大量细致的编辑工作。

本文集的出版得到了大庆石油管理局测井公司等测井单位的支持,在此谨表诚挚的谢意。

本书适用于测井技术人员、管理人员及相关专业人员阅读,也可作为高等院校地球物理专业学生的教学参考书。对于书中的不足之处请读者提出宝贵意见。

目 录

声反射成像测井在各向同性和各向异性地层中的三维波场模拟方法研究

..... 陶 果 何峰江 王 兵 王 华 李连锁 (1)

激发极化弛豫时间谱测井的理论与实验基础..... 王伟男 童茂松 (10)

井壁电成像测井全三维数值模拟..... 柯式镇 (18)

砂岩储层钻井液侵入及二次污染测井评价实验研究

..... 袁兆羽 何峰江 蔡敏龙 程晓峰 关小萍 王雪亮 陈军胜 (24)

过套管电阻率测井技术方法研究..... 包德洲 程 希 吴金云 (31)

EILog-05 测井装备在渤海湾盆地的应用..... 刘海啸 蔡文渊 高 敏 罗安银 (37)

高分辨率井壁侧向与岩性密度集成测井仪研制..... 张焕耀 张 海 刘 江 高 标 (47)

磁测应力技术研究及其在石油工程测井中的应用

..... 王忠义 周志彬 马文中 李自平 (53)

LEAD2.0 软件在长庆油田裸眼井解释中的应用

..... 李建鹏 张旭波 马德录 杨天明 (59)

水平井测井响应特征及其在地质导向中的应用..... 陈云峰 魏中文 刘岩松 李忠城 (63)

水平井岩石各向异性分析与可视化解释技术..... 刘复屏 李洪奇 马德录 武 装 (70)

川东生物礁的测井识别与评价技术

..... 张树东 齐宝权 杨仁林 熊福均 贺洪举 陈育勤 (78)

D 油田高孔低渗碳酸盐岩油藏水平井测井评价技术研究..... 田中元 李方明 周丽清 (85)

俄罗斯 ECOS-31-7 过套管电阻率测井仪及其在辽河油田的应用

..... 汤剑敏 张 杨 朱世和 姜春玲 (93)

测井中子发生器的技术分析

..... 王宏建 邵方华 王志勇 刘印堂 王志金 赵 平 (100)

多级脉冲深穿透聚能射孔技术 张维山 董拥军 王朝晖 刘庆东 魏光辉 (105)

基于光纤传感系统的石油测井技术进展

..... 刘统玉 王 昌 徐凌堂 常 军 陶 果 (112)

基于 MATLAB 的随钻自然伽马探测器数值模拟研究

..... 陈绪涛 祝环芬 王 飞 解 琪 (119)

水平井条件下感应测井三维数值模拟 ... 赵小青 丁 柱 朱道平 樊玉秀 方俊玲 (125)

小波能谱分析识别复杂储层流体特性 岳文正 陶 果 田 斌 刘东明 (131)

斜井储层钻井液侵入特性及双侧向测井响应数值模拟

..... 邓少贵 范宜仁 陈 华 杨 震 李智强 (138)

高分辨率阵列感应测井影响因素及质量控制

..... 丁娱娇 邵维志 王 英 毛 琪 张学成 邕红军 郝丽萍 (143)

阵列声波特殊处理技术的研究与应用 伍 东 张 辉 金英花 (152)

核磁共振测井影响因素及适应性分析	邵维志	丁娱娇	郝丽萍	周凤明	司兆伟	(160)		
低阻油层的电测井资料反演与动态侵入模拟	杨震	范宜仁	邓少贵	周凤鸣		(168)		
套管井测井新技术及其应用	戴月祥	雪伟	陈凤梅	田祖红	李梅	(172)		
基于平行四边形机构的极板推靠装置动力设计					许敏	(180)		
生产测井井下光电流体压差密度计设计			郭海敏	宋红伟	戴家才	(185)		
非均质碳酸盐岩测井资料解释中岩石体积模型的改进与应用	张承森	刘瑞林	祁兴中	郭秀丽	傅海成	(189)		
辽河油田水平井测井解释技术				郭春杰	岳海玲	(196)		
成像技术在大庆深层火成岩中的应用			李庆峰	王鹏	王宏建	(204)		
阵列感应电阻率测井流体识别技术在华北地区的应用	梁兰芝	黄胜	刘宁静	李振苓	蔡文渊	(210)		
吉林油田红岗北地区低阻油层测井评价技术研究	张建民	刑艳娟	石丹红	孙娟	王燕津	(218)		
克拉玛依油田六中区油藏水淹层识别方法研究	唐建红	陈芸娟	姬嘉琦	姜涛	时新芹	韩敬伟	付井喜	(225)
高压低渗致密裂缝性砂岩测井评价技术研究	肖承文		李进福	李军	陈伟中			(232)
柴达木盆地七个泉油田复杂砂岩储层综合评价技术		杨洪明	梅基席	安群	范一华			(239)
二连地区低孔、低渗储层测井解释方法研究	王建功	鞠江慧	刘英	孙玉红				(248)
测井资料在碳酸盐岩裂缝评价中的应用研究	范乐元	李英波	王元莉	孙利国				(255)
塔里木盆地碳酸盐岩电成像测井相分析技术及其应用	祁兴中	钟广法	张承森	刘兴礼	袁仕俊			(261)
利用 FMI 成像测井定量评价碎屑岩储层非均质性				李潮流	周灿灿			(267)
川中地区碎屑岩矿物成分精细处理方法研究		胡振平	罗利	甘秀娥				(273)
测井技术在火山岩储层评价中的应用		程相志	周灿灿	范宜仁				(280)
哈萨克斯坦 KK 潜山复杂岩性储层测井响应特征研究	罗曼	林雅平	郑俊章	周海燕	张明军			(288)
四川碳酸盐岩地层套管井测井及评价技术研究	罗利	文泽军	尹国平	刘友光				(297)
吉林油田浅层水平井测井工艺技术		曹宇欣	张柏枫	韩志荣				(303)
超长水平段水平井电阻率成像测井工艺研究	牟金东	张炳军	孙建伟	周扬	冯相君			(310)
全通径射孔与加砂压裂联作技术及在岳 2 井实践				陈锋	唐凯			(315)
稠油井射孔研究				门孟东	汤丽娜			(319)

声反射成像测井在各向同性和各向异性地层中的三维波场模拟方法研究^①

陶 果¹ 何峰江¹ 王 兵¹ 王 华¹ 李连锁²

1. CNPC 测井重点实验室, 中国石油大学(北京); 2. 大港油田测井公司

摘要: 本文建立了非均匀交错网格、加 PML 吸收边界的、能够用于正交各向异性介质的三维有限差分数值模拟方法, 并实现了并行算法。将其应用于典型各向同性和各向异性地层中反射声波成像测井的三维波场模拟, 并与已公开发表的应用离散波数方法的相应结果对比, 证明了此方法正确、算法高效。模拟的波场动态范围能够大于 60dB, 计算速度比常规算法提高了 3.5 倍。这些技术能够正确、有效地模拟大尺度(在 10m 左右)、较高频率(10kHz 左右)的反射声波成像测井波场。为我们研究声反射成像测井仪器和资料处理解释方法提供了有力的定量分析工具。

关键词: 反射声波成像 三维波场模拟 非均匀交错网格 PML 吸收边界 并行算法

近年来, 声反射成像测井方法和仪器研制成为勘探地球物理界的新研究热点之一。国际上, Schlumberger 公司继数年前研制出的 BARS (Borehole Acoustic Reflective Survey)^[1] 仪器之后, 2006 年又推出了含有改进的声反射成像功能的新仪器 SonicScanner^[2]; Baker Hughes 公司开发出了基于 XMACII 仪器的声反射成像处理软件^[3]。我国大港油田测井公司于 2005 年开发了声反射成像新仪器^[4]

这些仪器在井内测量时其声源辐射到地层中的能量以 P 波和 S 波的形式向外传播。当遇到声阻抗不连续界面时会发生反射和折射(图 1), 并伴随着 P 波和 S 波之间的相互转换。由 Snell 定律, 当发射和接收换能器都位于分界面上倾(或下倾)一侧时, 会接收到 P—P 波反射信号(图 2)。当发射器和接收器分别置于分界面的上、下倾一侧时, 会接收到 P—S 转换波信号和 S—P 转换波信号(图 3)。实际上在图 2 所示情形下, 还可能接收到 P—S 波、S—P 波, 以及 S—S 转换波。用这些井附近的反射波信号成像能够获得有关地质构造位置, 几何形态, 倾角, 方位等重要信息^[5,6]。然而, 目前这项重要的应用往往遇到很大困难, 因为有利于成像的反射波信号被淹没在沿井壁传播的直达波信息中而变得模糊不清, 这些反射波与井中的模式波叠加, 难以分离出来。以往为了得到对反射信号的初步认识, 一般采用几何声学的方法来分析反射信号的信息^[5]。

但是用几何声学的方法无法研究反射波场的幅度和频率响应特性, 而反射声波的波长一般比井眼、测井仪半径大几倍。另外, 实际地层一般都是各向异性介质, 这些因素更使得几何声学的方法难以用来解决实际问题。鉴于实际波场的复杂性, 为研究有效的波场分离和反射声波构造成像方法, 分析反射波场的幅度和频率响应特性, 必须用以波动方程为基础的数值模拟方法来精确描述。有限差分方法是一种常用的模拟弹性波场的有效方法。本文综合运

① 国家自然科学基金项目 50674098 资助。

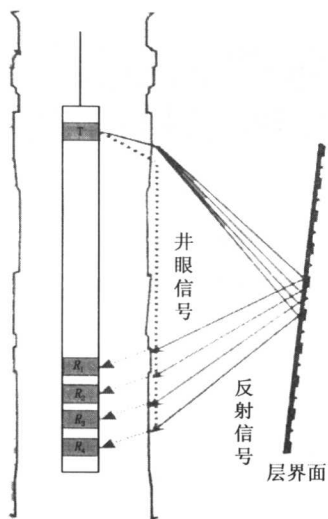


图1 声反射成像测井示意图

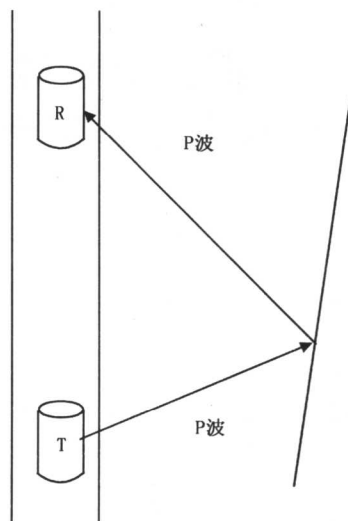


图2 P-P反射波示意图

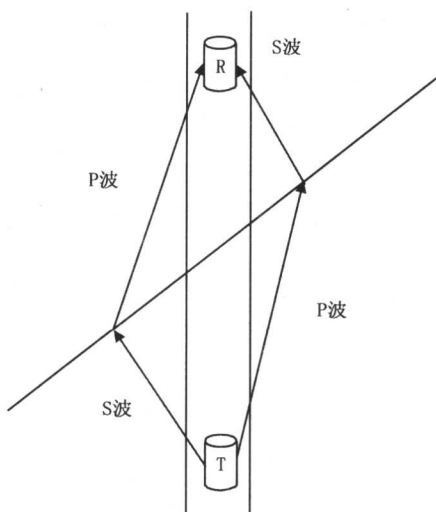


图3 P-S和S-P转换波示意图

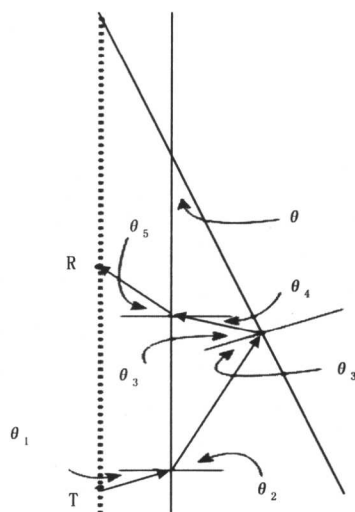


图4 P-P反射波角度示意图

用二维和三维局部加密交错网格有限差分方法分别对声反射成像测井在各向同性和各向异性地层中的反射声场及传播规律进行了探讨。

1 交错网格有限差分方法的几个特点

1.1 局部加密交错网格与完全匹配吸收边界 (PML)

交错网格有限差分方法是一种比较成熟的数值模拟方法,它使用应力—速度—一阶方程组,并采用应力、速度在时间和空间交错的离散方案。该方法可以达到空间4阶、时间2阶的精度,且具有递推形式的显格式,便于并行化^[7,8]。

交错网格的网格划分一般是均匀的。但实际地层中往往存在非均质性，更合理的方案是在包含流体的局部区域中使用细网格，而在外围地层中则使用较粗的网格，以提高计算效率^[9]。图 5 展示了本文采用的井孔附近网格加密的模型。

在非均匀网格区域，网格节点上的差分公式不同于均匀网格区域。沿坐标轴，网格交错如图 6 所示。

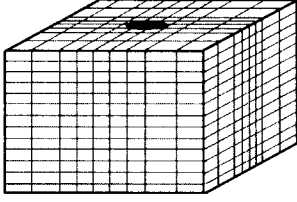


图 5 非均匀网格示意图

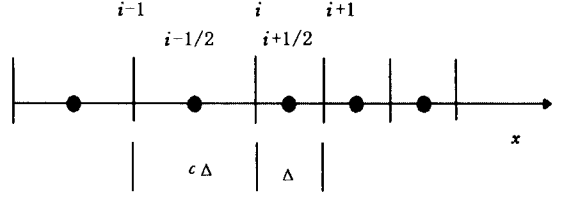


图 6 沿 x 坐标轴变网格步长示意图

设细网格的步长为 Δ ，粗网格步长为细网格的 c 倍。则有：

$$\begin{aligned}\phi_i &= \phi_{i+\frac{1}{2}} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \right) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^3 + \dots \\ \phi_{i+1} &= \phi_{i+\frac{1}{2}} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \right) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^3 + \dots \\ \phi_{i-1} &= \phi_{i+\frac{1}{2}} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \right) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^3 + \dots \\ \phi_{i+2} &= \phi_{i+\frac{1}{2}} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \Delta \right) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \left(\frac{1}{2} \Delta \right)^3 + \dots\end{aligned}\quad (1)$$

在 4 阶精度下， $(i + 1/2)$ 处的一阶导数 $\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{i+\frac{1}{2}}$ 可以由 ϕ_{i-1} 、 ϕ_i 、 ϕ_{i+1} 和 ϕ_{i+2} 线性表出：

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{i+\frac{1}{2}} = \eta_1 \phi_{i+1} - \eta_2 \phi_i + \eta_3 \phi_{i+2} - \eta_4 \phi_{i-1} \quad (2)$$

$$\eta_1 = \frac{4c+5}{4(c+1)\Delta}, \quad \eta_2 = \frac{8c+1}{8c\Delta}, \quad \eta_3 = -\frac{1}{8(c+2)\Delta}, \quad \eta_4 = -\frac{1}{4c(2+3c+c^2)\Delta}$$

当 $c=1$ 时， $\eta_1 = \eta_2 = \frac{9}{8}$ ， $\eta_3 = \eta_4 = \frac{1}{24}$ ，此即为 Levander 给出的均匀网格 4 阶差分算子。

同理可以求出 $(i - c/2)$ 处的一阶导数的差分算子：

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{i-\frac{c}{2}} = \eta_1 \phi_i - \eta_2 \phi_{i-1} + \eta_3 \phi_{i+1} - \eta_4 \phi_{i-2} \quad (3)$$

$$\eta_1 = \frac{c+8}{8c\Delta}, \quad \eta_2 = \frac{5c+4}{4c(c+1)\Delta}, \quad \eta_3 = -\frac{c^2}{4(2c^2+3c+1)\Delta}, \quad \eta_4 = \frac{1}{8(2c+1)\Delta}$$

在迭代计算过程中，还存在由图 6 中圆点位置处的函数值表征竖直线处一阶导数的问题

题。另外,图6中显示的情况只是从大网格到小网格的情况,还有一种情况是从小网格到大网格过渡。在这些情况下,一阶差分算子的推导过程与上述过程基本相同。

在三维数值模拟中,我们只考虑在 x 和 y 轴上变化网格大小。由于井孔从上到下贯穿整个模型,所以 z 轴取均匀网格。沿 y 轴的差分算子,其表达式与 x 轴相同。为了减少计算边界的反射,采用了完全介质匹配层^[10]作为模型的吸收边界。由于局部加密交错网格有限差分是一种显格式迭代,因而可以比较容易进行并行化,以提高计算速度。

1.2 声源

声源的选取和加载,对数值模拟的成功至关重要。本文使用爆炸源与力源两种声源。源函数分别为:

$$\begin{aligned} \text{爆炸源} \quad p(t) &= -2\zeta(1-2\zeta T^2)e^{-\zeta T^2} \\ \text{力源} \quad f(t) &= 4\zeta^2(3T-2\zeta T^3)e^{-\zeta T^2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\zeta = F_0^2/0.1512$, F_0 是中心频率; $T = t - t_s$, $t_s = 1.5/F_0$ 是时移参数。这样选择的声源函数具有最小相位,有利于各模式波的分离。

震源加载采用 Coutant 的方法^[11]。爆炸源加载在主应力节点上,力源加载在速度节点上。

1.3 并程序序设计

声反射成像测井数值模拟的计算量非常大,为了提高计算速度有必要采用并行计算。从其差分方程可见,其方程组为显示递推格式。时间上,某一时间层上的变量只与前一时间层的变量有关;空间上,某一空间点上的变量只与其周围几个点的变量有关。根据空间的局部特性,本文建立了一种粗粒度的并行计算方法。这种方法把计算区域分成几个小的区域。每个小区域独立进行计算,只在各个小区域的边界处存在数据交换。该方法比较适用于集群式的并行计算环境。根据时间上的递推特性,可以开发出一种细粒度的并行计算方法。这种并行化方法对某一时间层上的变量在整个计算区域上同时进行。该方法使用共享内存,因而适用于 SMP 结构。本文选用这种细粒度并行化方法^[12]。

为保证模拟结果的正确性和精度,我们用标准的模型对这种非均匀网格方案的正确性进行了验证,并将非均匀网格数值模拟结果与均匀网格数值模拟的结果做对比^[9]。

1.4 各向异性介质的差分方程

与各向同性介质不同,各向异性介质中,对介质的描述必须使用 4 阶弹性系数张量 C_{ijkl} 。实际岩石大多可以用正交各向异性模型来描述。因此,弹性系数张量可以转化为如下的刚度矩阵:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

正交各向异性固体具有 3 个互相正交的对称面,需要 9 个独立参数来描述。横向各向同

性地层 (TIV) 和方位各向异性地层 (TIH) 的刚度矩阵都可以由式 (6) 简化得到。

在正交各向异性介质中, 线性一阶方程组变为如下形式:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} & \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} & \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} & \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial t} &= c_{12} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{23} \frac{\partial v_z}{\partial z} & \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{23} \frac{\partial v_y}{\partial y} + c_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} &= c_{44} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} &= c_{55} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) & \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial t} &= c_{66} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

对方程组 (6) 的离散, 采用与各向同性介质差分方程相同的方法。\$\rho\$ 和 \$c_{11}\$、\$c_{12}\$、\$c_{13}\$、\$c_{22}\$、\$c_{23}\$、\$c_{33}\$、\$c_{44}\$、\$c_{55}\$、\$c_{66}\$ 赋值的位置也类似。\$\rho\$ 的计算使用算数平均值, 其余使用调和平均值。对正交各向异性介质, 依然采用与各向同性介质差分方程相同的频散和稳定性条件。但此时, 速度变量 \$v_p\$ 指介质中最快的 quasi-P 波波速。由于正交各向异性介质中的方程组与各向同性介质中的方程组在形式上一致, 所以 PML 介质方程组的形式也不变, 只是在相应位置上用 \$c_{ij}\$ 代替 \$\lambda\$、\$\mu\$。

2 声反射测井全波场的三维数值模拟实例

2.1 各向同性地层井中三维反射波场模拟

假设模型的介质参数如表 1 所示。井径 0.2m, 声源为单极子源, 频率 10kHz, 模型长 (\$x\$) 6m, 宽 (\$y\$) 2m, 高 (\$z\$) 10m。地层介质 1 和介质 2 的交界面与井轴的夹角为 \$15^\circ\$, 靠近井轴一侧为介质 2。该交界面垂直于 \$x-z\$ 平面, 交 \$x\$ 轴于 (4.8, 0.0, 0.0) 点。井轴位于 \$x=1\text{m}\$、\$y=1\text{m}\$ 处。声源位于井轴上, 距底界面 1.0m。

当有反射界面存在时, 用有限差分方法可以求出整个声场的波动情况。图 7 展示了在第 4ms 时刻的声场快照。

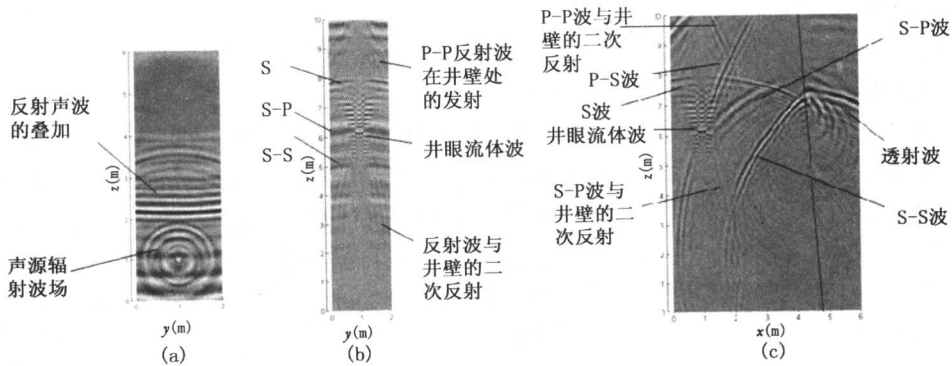


图 7 波场快照

(a) 为水平面 \$x-y\$ 上的快照; (b) 为过井轴的垂直平面 \$y-z\$ 上的快照;
(c) 为过井轴垂直于 (b) 的 \$x-z\$ 平面上的快照

从图 7 可见, 在人工边界处无明显的反射。这说明完全介质匹配层对入射弹性波的吸收比较好, 能够作为这种非均匀介质数值模拟的吸收边界。图 7 (a) 中明显可见从声源辐射

出的声场以及从远处反射界面反射回来的声场。图 7 (b) 显示声场在面上是对称的。在 6m 以下可见明显的反射波以及发射波与井眼相互作用产生的二次反射波（椭圆波阵面）。图 7

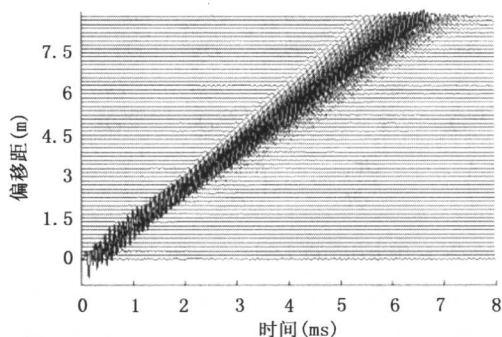


图 8 共炮点波形阵列

(c) 中显示了在反射面上声场的作用情况。从图中可见 P-S、S-P 和 S-S 反射波。P-P 反射波在此时刻已经传播到了界面以外，所以看不见。

位于井轴处的接收器所接收到的全波列阵列如图 8 所示。由于纵波和各反射波的幅度较小，所以无法直接看到。去除井中模式波的影响之后（图 9），可以看出比较明显的反射波信号。对比时距曲线（图 10），可以明显地判断出 P-P 波、S-S 波、S-P 波。而 P-S 波幅度较小，在图 9 中难以显现出来。

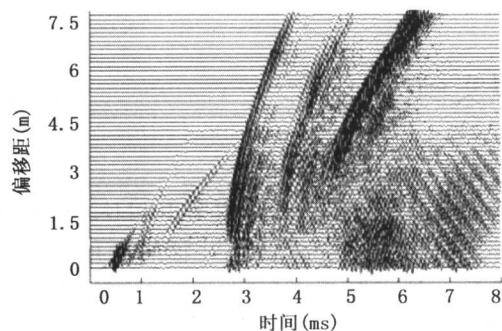


图 9 反射波共炮点数据

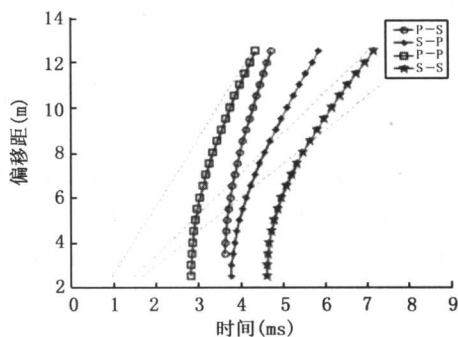


图 10 时距曲线

结合数值模拟结果及时距曲线可知，当源距在 6~10m 范围内，P-P 反射波最容易被提取，是最理想的接收信号波形。

我们进一步将模型在 x 方向扩展至 10m，反射界面随之沿 x 轴后移至 8.4m 处。图 11 给出了由此得出的在第 4ms 时的波场快照。

图 11 (a) 中显示了井周的首波波动及向远处辐射的纵波波动。图 11 (b) 则显示了声场在该切面上关于井轴的对称性。从图 11 (c) 中可见由纵波在反射界面上激起的 P-P 波和 P-S 波。图 11 (a) 和图 11 (b) 均未见明显的来自计算边界的反射波。在图 11 (c) 中横波下方可见一非常模糊的反射波信号。这个信号来自横波在 $x=0$ 边界的反射。图 12 是对应于图 11 $z=7m$ 处的接收器接收到的信号（分量）。可以看出横波的最大幅度约为 3.3×10^{-5} ，与其对应的来自 $x=0$ 边界的反射波最大幅度约为 1.8×10^{-8} 。二者之比大于 60dB，这说明该数值模拟的动态范围大于 60dB。

综上所述，本文的数值模拟方法能够满足声反射成像测井模拟所需的三维、大尺度及大动态范围的要求。

2.2 各向异性介质井中的波场模拟

为了考察本文的数值模拟方法在各向异性介质中的适用情况，建立一个有井条件下的各向异性介质模型。各向异性介质的参数如表 2 所示。模型尺度 $2m \times 2m \times 4m$ ，井孔位于模型

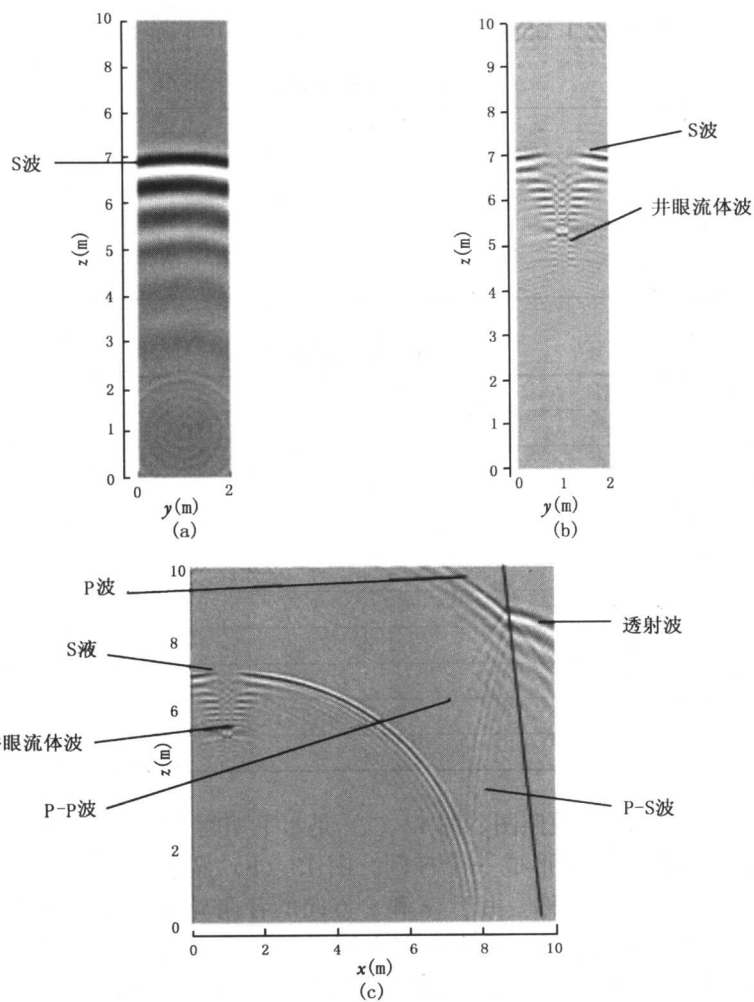


图 11 波场快照

(a) 水平切面 $x-y$ 上的快照; (b) 过井轴的垂直平面 $y-z$ 上的快照;
(c) 过井轴垂直于 (b) 的 $x-z$ 平面上的快照

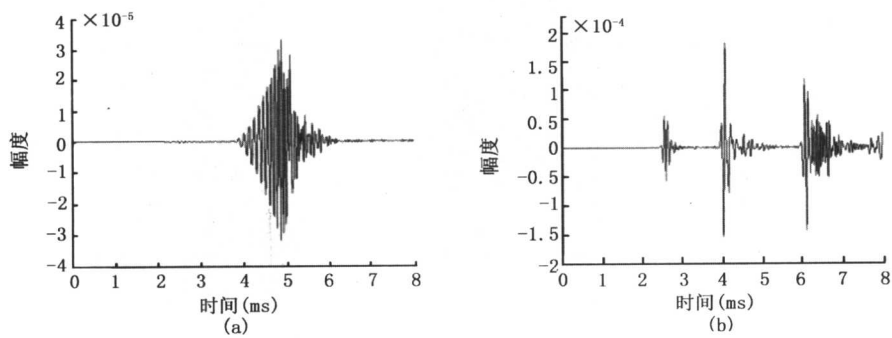


图 12 $z=7$ m 处的全波信号及反射波信号

中央，井径 20cm。声源为单极子源，频率 10kHz。流体密度为 1.0g/cm^3 ，速度 1500m/s 。网格间距 1.5cm ，时间步长 $1.65\mu\text{s}$ 。

表 1 介质参数表

参数 \ 介质	流体介质	地层介质 1	地层介质 2
密度 (g/cm^3)	1.00	2.40	2.00
纵波速度 (m/s)	1500	4500	3000
横波速度 (m/s)	0	2650	1800

表 2 各向异性介质参数

参数类型	参数值
ρ (kg/m^3)	1340
c_{11} (Pa)	$2.08\text{E}10$
c_{12} (Pa)	$1.147\text{E}10$
c_{13} (Pa)	$7.26\text{E}9$
c_{22} (Pa)	$1.746\text{E}10$
c_{23} (Pa)	$7.87\text{E}9$
c_{33} (Pa)	$1.006\text{E}10$
c_{44} (Pa)	$2.59\text{E}9$
c_{55} (Pa)	$2.59\text{E}9$
c_{66} (Pa)	$5.04\text{E}9$

图 13 为声场在某时刻的快照图。图 13 (a) 是水平切面上的快照，可以看出由于 x 和 y 方向各向异性，导致波阵面形成一个椭圆。图 13 (b) 显示了过井垂直剖面上的波场快照，可以看出声场关于井轴对称。由于 x 和 z 方向各向异性导致首波的波阵面不再是一个锥面，而是略有弯曲。在 $y-z$ 平面上存在同样的特点。这些结果与文献 [8, 13, 14] 一致。仔细检查可见，在图 13 上看不到由计算边界产生的反射，这说明本文构造的 PML 吸收边界在各向异性介质数值模拟中依然是高效的。这些结果都证明我们的数值模拟方法是正确和有效的。它可为我们研究声反射成像测井仪器和资料处理解释方法提供了有力的定量分

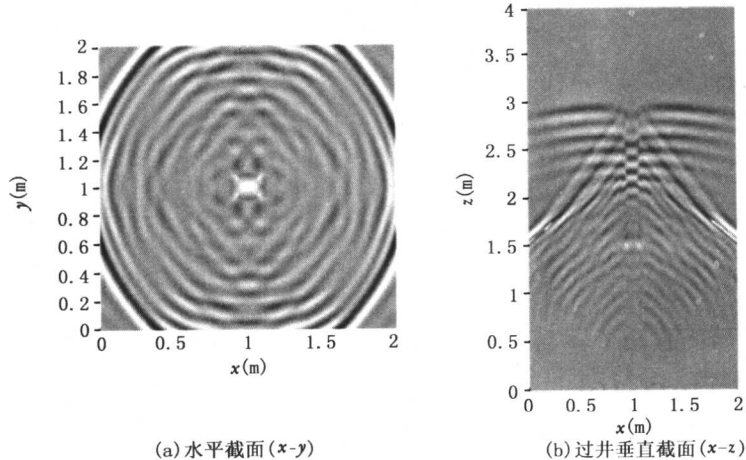


图 13 各向异性介质中的声场快照

析工具。

3 结 论

本文针对反射声波成像测井波场模拟问题,建立了非均匀交错网格、加 PML 吸收边界的、能够用于正交各向异性介质的三维有限差分数值模拟方法,并实现了并行算法。将其应用于典型模型算例,并与已公开发表的参考文献的相应结果对比,证明了此方法正确、算法高效。模拟的波场动态范围能够大于 60dB,计算速度比常规算法提高了 3.5 倍。这些技术能够正确、有效地模拟大尺度(在 10m 左右)、较高频率(10kHz 左右)的反射声波成像测井波场。为我们研究声反射成像测井仪器和资料处理解释方法提供了有力的定量分析工具。

参 考 文 献

- [1] Schlumberger Geoquest. Geoframe BARS user' guide. Version 1. 0. Kanagawa: Schlumberger K. K., 1998: 1-6
- [2] V. Pistre, T. Kinoshita, T. Endo, K. Schilling, J. Pabon, B. Sinha, T. Plona, T. Ikegami, and D. Johnson. A Modular Wireline Sonic Tool for Measurements of 3D (Azimuthal, Radial, and Axial) Formation Acoustic Properties, SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, United States, June 26-29, 2005
- [3] Y. Zheng, and Tang, X. Imaging near-borehole structure using acoustic logging data with pre-stack F-K migration; 75th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., 2005
- [4] 大港油田集团测井公司. 远探测声波成像测井方法与仪器研究项目研究进展(内部资料). 2005
- [5] Hornby, B. E. Imaging near-borehole of formation structure using full-waveform sonic data, Geophysics, 54, 747-757, 1989
- [6] Tang, X. M. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement; Geophysics, 2004, 69 (1): 1-10
- [7] Sun Weitao, Studies on the elastic wave field in complex media with finite difference method and global optimization, Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [8] Chen Ninya, Borehole wave propagation in isotropic and anisotropic media: Three dimensional finite difference approach, PHD thesis, Cambridge: MIT, 1994
- [9] 何峰江, 陶果, 王锡莉, 贴井壁声波测井仪的有限差分模拟研究. 地球物理学报, 2006, 49 (3): 923-928
- [10] Zeng Y. Q., He J. Q., Liu Q. H.. The application of the perfectly matched layer in numerical modeling of wave propagation in poroelastic media, Geophysics, 2001, 66 (4): 1258-1266
- [11] Coutant O., Virieux J. and Zollo A.. Numerical source implementation in a 2D finite difference scheme for wave propagation. Bull. Seism. Soc. Am., 1995, 85 (5): 1507-1512
- [12] Xinmin T., Aart B., Milind G., et al. Intel OpenMp C++/Fortran Compiler for hyper-threading technology: implementation and performance. Intel Technology Journal Q1, 2002,, 6 (1): 1-10
- [13] Cheng C H and Töksöz M N. Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs. Geophysics, 1981, 46 (7): 1042-1053
- [14] Bouchon M., A review of the discrete wavenumber method, Pure Appl. Geophys. 2003, 160: 445-465

激发极化弛豫时间谱测井的理论实验基础^①

王伟男 童茂松

大庆石油管理局钻探集团测井公司, 黑龙江大庆, 163412

摘要: 激发极化弛豫时间谱测井是我国自主发明的一种测井新方法。本文阐述了激发极化弛豫时间谱测井的概念, 从理论和实验角度论述了该方法的可行性, 研究了岩石激发极化弛豫时间谱的各种影响因素, 建立了弛豫时间谱与地层渗透率等参数之间的关系。研究表明, 岩石激发极化弛豫时间谱是由多个具有不同时间常数的衰减指数合成的, 它与地层孔隙结构和渗透率有非常重要的关系, 完全可以用于测井地层评价, 而且激发极化弛豫时间谱与核磁测井的 T_2 谱非常相似, 因此具备核磁测井的一些功能。

关键词: 激发极化测井 弛豫时间谱 孔隙结构 渗透率

激发极化弛豫时间谱测井是将岩石激发极化二次场电位随时间的衰减谱拟合成弛豫时间谱, 再通过岩石物理实验建立起弛豫时间谱与储层参数之间的关系, 进而确定储层参数。研究表明, 岩石激发极化弛豫时间谱是由多个具有不同时间常数的衰减指数合成的, 它与地层渗透率、孔隙结构以及孔隙度之间有良好的相关关系, 完全可以用于地层评价^[1]。

岩石的激发极化现象是斯伦贝谢公司首先发现的, 并于 1920 年在金属矿床首次进行了测量^[2]。20 世纪 30 年代末期, 原苏联在油田测井中引入了激发极化法, 用于确定地层的渗透率。我国于 20 世纪 60 年代从原苏联引进了激发极化测井方法, 当时只测二次场电位, 称人工电位测井。70 年代以后, 大庆、胜利、南阳等油田、江汉测井所和一些大专院校相继开展了激发极化测井方法研究, 大庆、南阳和江汉测井所还研制了测井仪器, 其中比较有代表性的是 90 年代江汉测井研究所研制的激发极化和自然电位组组合仪。

人工电位测井只测量被激发地层在断电瞬间的二次场电位。传统的激发极化测井比人工电位测井进了一步, 利用二次场电位与激发场电位的比值, 一定程度上能消除一些不利因素的影响 (如矿化度的影响)。而激发极化弛豫时间谱测井方法是利用谱的信息, 所包含的信息量远远大于极化率和人工电位测井, 通过进一步研究, 还可以得到更多的地质应用。

激发极化弛豫时间谱测井是具有自主知识产权的测井新方法, 是大庆测井公司在多年研究工作的基础上提出来的, 并且已经完成了先导性实验研究, 申请了两项发明专利。

1 岩石激发极化弛豫时间谱拟合技术

理论分析表明, 单个孔隙中激发极化二次场电位的衰减满足单指数衰减规律^[3,4], 但是岩石内部是由一系列大小不等的孔隙群体组成的, 所以岩石的激发极化二次场电位 $U(t)$ 是一系列单个孔隙极化电位的叠加, 二次场电位 $U(t)$ 按照 $t=0$ 时的二次场 $U(0)$ 归一

① 石油天然气集团公司技术中心专项课题。

化, 然后进行多指数拟合, 即

$$\frac{U(t)}{U(0)} = \sum_{i=1}^N S_i \exp(-t/T_i) \quad (1)$$

式中 S_i ——时间常数为 T_i 的孔隙体积百分比, 无量纲。

指数衰减的数目取决于激发极化衰减谱的信噪比, 通常情况下 N 为 3~5 即可满足精度要求, 但是 N 取较大的值时, 例如 64 或者 128 可以取得更为精确的结果, 弛豫时间谱更为光滑。

理论和实验研究表明, 时间常数 T_i 和孔径之间有如下的关系^[5]:

$$R_i = (D \cdot T_i)^{1/2} \quad (2)$$

式中 R_i ——第 i 个孔隙的半径, cm;

D ——溶质的扩散系数, cm^2/s 。

每一个时间常数代表一种孔径, 而前面的系数代表这种孔径的百分含量, 对 S_i 和 R_i 作图即可得到孔径分布曲线。

为了确定方程 (1) 中的系数, 将其离散得到线性方程组:

$$Ax = y \quad (3)$$

式中, A 为 $M \times N$ 矩阵, 且 $A_{ij} = \exp(-t_i/T_{2j})$ 。 $x_i = P(T_{2i})$, 是 T_2 谱的离散形式, 长度为 N 。 y 为长 M 的数据向量, $y_i = M(t_i)$ 。在数据噪音为 0, 均值为 Gauss 分布的假设条件下, 可求得式 (3) 最小二乘意义下的解。

对于离散方程组 (3), 若数据没有噪音, 能求出一个精确模型使等式成立。由于噪音的存在, 只能求得如下最小二乘意义上的解 x :

$$\min: \|y - Ax\|^2 \quad (4)$$

对方程 (4) 的求解可直接利用 MS Visual Fortran 6.0 标准数学库中的函数 BCNLS。用 BCNLS 作离散化反演后再作响应的约束, 求得的离散弛豫时间谱见图 1。

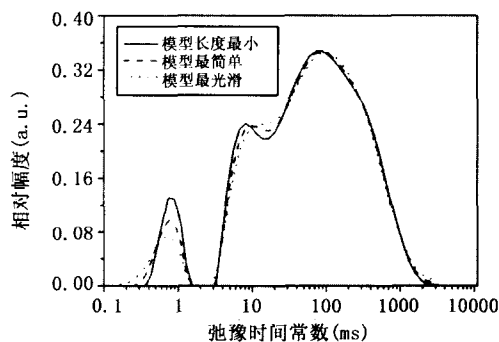


图 1 三种模型约束方法对实测岩心数据的拟合结果

2 影响岩石激发极化弛豫时间谱形态的主要因素

2.1 拟合点数的影响

谱处理参数主要分析了拟合点数目对弛豫时间谱的影响。拟合点数目对谱光滑程度有影响 (图 2)。随着拟合点数目的增加, 曲线变得更加光滑, 而且峰形更加明显。当拟合点数目大于 64 时, 拟合曲线基本重合, 而且当拟合点数目大于 64 时, 拟合点数目不影响谱的峰值位置。因此, 本文选择拟合点数目为 64。