

· 非地震 ·

高分辨率反演方法及其在核磁共振测井数据处理中的应用

翁爱华* 李舟波 陆敬安 莫修文

(吉林大学应用地球物理系)

摘 要

翁爱华, 李舟波, 陆敬安, 莫修文 高分辨率反演方法及其在核磁共振测井数据处理中的应用. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 208~212

本文对核磁共振测井数据的高分辨率弛豫谱反演技术及实际应用效果进行了讨论。首先, 介绍了基于梭状函数抽样的高分辨率弛豫谱反演方法的原理, 并用该方法对岩心核磁数据进行了弛豫谱分解, 讨论了弛豫谱抽样间隔对该方法的影响; 其次, 高分辨率弛豫反演结果和压汞结果的比较证明了弛豫谱反演方法的高分辨率优点。实际核磁测井数据分别来自砂泥岩井段的高泥质含量与低泥质含量两个层位, 通过与常规弛豫谱反演结果的对比可以发现, 采用高分辨率的弛豫谱反演技术能够更加精细地给出孔隙流体的弛豫分布, 并获得真正意义的高分辨率弛豫谱。

关键词 核磁共振测井 高分辨率 弛豫谱反演

引 言

在常规的核磁共振测井解释技术中, 横向弛豫时间谱(以下称 T_2 弛豫谱)是核磁共振测井储层孔隙率、渗透率和饱和度的解释基础^[1]。因此, T_2 弛豫谱反演技术在核磁共振测井中具有重要地位。目前, 由观测的回波衰减序列获得 T_2 弛豫谱都采用梭状函数将两者的联系方程——第一类的 Fredholm 方程离散化, 然后在谱估计非负约束条件下采用正则化反演技术反演^[2]。

采用梭状函数离散化获得的方程组进行 T_2 弛豫谱反演, 直观且易于实现。但翁爱华等^[3]通过理论研究发现该反演方法分辨率不高。将 T_2 谱反演时弛豫时间的抽样间隔做得很小, 以提高反演结果的分辨率, 在理论上是困难的。为此, 翁爱华等采用了阶梯函数对核磁测井中的 Fredholm 方程进行离散化, 给出了基本方程及其计算技术^[3]。

通过理论分析, 指出采用阶梯函数抽样反演技

术能从根本上增加方程求解的稳定性, 明显提高反演参数的分辨率, 从而在理论上得到真正意义的高分辨率弛豫谱。我们把采用阶梯函数抽样反演称为核磁共振测井高分辨率反演。本文首先简单介绍这种高分辨率 T_2 谱反演技术的基本原理, 讨论待参数个数对反演谱的影响; 在此基础上, 比较了典型岩心压汞孔径分布直方图与高分辨率反演弛豫谱的对应关系; 最后, 用该反演方法对高泥质含量砂岩剖面 and 低泥质含量含油气砂岩剖面上的实际核磁测井数据进行了反演, 以检验该反演方法的实际反演效果。

高分辨率反演方法

在核磁共振测井中, 自由感应衰减信号 $y(t)$ 与连续横向弛豫谱分布 $P(T_2)$ 满足如下的第一类 Fredholm 积分方程^[4]

$$y(t) = \int_{T_{2,\min}}^{T_{2,\max}} P(T_2) e^{-\frac{t}{T_2}} dT_2 \quad (1)$$

式中: $T_{2,\min}$ 与 $T_{2,\max}$ 分别是测量的自由感应衰减信

* 本文于2002年6月26日收到, 修改稿于2003年2月17日收到。
本研究属国家自然科学基金项目(编号: 49874028)。

号所能分辨的最短与最长弛豫时间, 通常 $T_{2,\min} = 2TE$, $T_{2,\max} = 5000\text{ms}$, TE 为测量回波间隔^[5]。

采用阶梯函数对式(1)弛豫谱离散, 即

$$P(T_2) = \sum_{j=1}^M P_j H_j(T_2) \quad (2)$$

式中 M 为弛豫谱离散个数, 而

$$H_j(T_2) = \begin{cases} 1 & T_{2,j} \leq T_2 < T_{2,j+1} \\ 0 & T_2 < T_{2,j} \text{ 或 } T_2 > T_{2,j+1} \end{cases} \quad (3)$$

即 $H_j(T_2)$ 是定义在区间 $[T_{2,j}, T_{2,j+1}]$ 上的矩形函数。把式(2)代入式(1)有

$$y(t) = \sum_{j=1}^M P_j \int_{T_{2,j}}^{T_{2,j+1}} e^{-\frac{t}{T_2}} dT_2 \quad (4)$$

将时间 t 离散化, 即假设有 N 个回波序列, 从而有离散线性方程组

$$y = Ax \quad (5)$$

其中 y 为长 N 的回波数据向量, $x_i = P_j$, 是 T_2 谱的离散形式。系数矩阵元素为

$$A_{ij} = \int_{T_{2,j}}^{T_{2,j+1}} e^{-\frac{t_i}{T_2}} dT_2 \quad (6)$$

对式(6)可采用 5 点 Legendre-Gauss 积分方法计算^[6]。对于式(5), 利用奇异值分解^[7], 可对相应的非负条件约束的正则化方程借助投影迭代方法求解^[8-10]。

图 1a 是采用高分辨率反演方法对某岩心测量回波数据及其反演结果。图 1b 中实线和虚线分别表示梭状函数和阶梯函数。从图 1 可见, 两种反演方法得到的谱在孔隙分布上基本一致, 但高分辨率反演的弛豫谱分辨率明显高于梭状函数反演结果。图 2 比较了某岩心压汞孔径分布直方图与不同抽样区间数为 M 时高分辨率反演获得的弛豫谱。从图中可见, 不同 M 时反演得到的弛豫谱与压汞孔径分布直方图基本一致。 M 较小时, 如 $M = 16$, 参数分辨率低, 从而模糊真解的某些细节特征; M 越大, 则离散子区间间隔越小, 参数分辨率越高。因此, 经分析比较, 我们在反演过程中取 $M = 64$ 。需要说明的是, 在图 2b 中虚线右侧的压汞孔径及其孔隙体积比例为计算所得值, 该值是所有不可压穿孔隙中总流体的体积比例, 若可动流体比例为 MF , 则该最小孔径比例为 $1 - MF$ 。下面各图中情况也是如此。

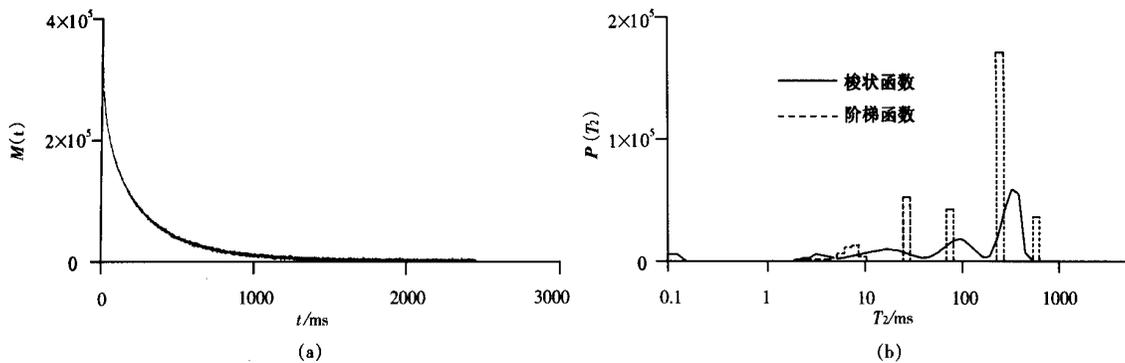


图 1 岩心核磁共振数据的高分辨率反演弛豫谱
(a) 回波衰减数据; (b) 弛豫谱分布

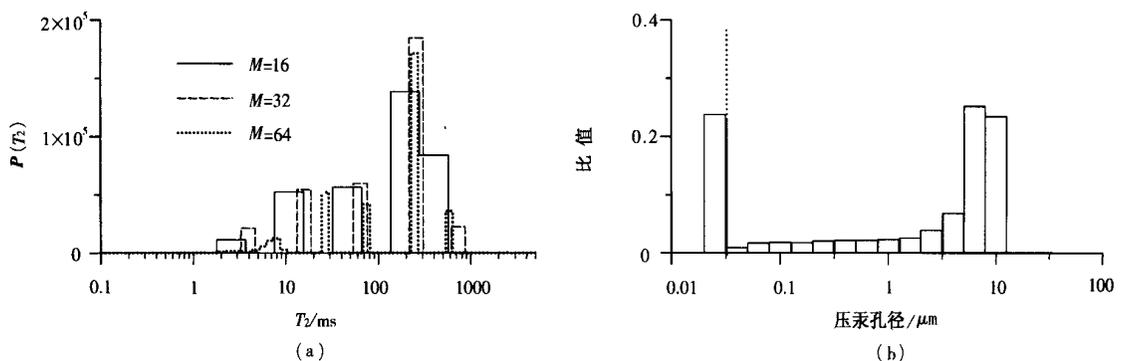


图 2 抽样间隔数对高分辨率反演结果的影响
(a) 弛豫谱; (b) 压汞孔径分布直方图

高分辨率反演谱与岩心 压汞结果对比

通常,压汞方法是获得岩石孔隙孔喉及其分布的重要岩石物理实验手段之一。但核磁共振回波信号的弛豫速率与岩石孔隙(孔隙体积与表面积比)有直接的关系,因此也可利用实验室核磁共振测量对岩石孔隙结构进行研究。虽然这两种方法并不反映相同的孔隙结构特征,但对于碎屑岩,若成岩作用不

强烈,孔隙孔喉/孔隙体积变化不大,在有利的条件下核磁共振弛豫谱与压汞孔径分布直方图可一致地反映岩石孔隙。

图3比较了5块不同孔隙结构岩心标本的压汞孔径分布直方图与高分辨率反演的弛豫谱。这些岩心分别代表高孔隙率、高渗透率,中孔隙率、中渗透率和低孔隙率、低渗透率三种情况,表1具体描述了对应于这三种储层的典型岩心测量结果。从图3中可见,高分辨率反演方法获得的弛豫谱与压汞孔径分布直方图基本一致。

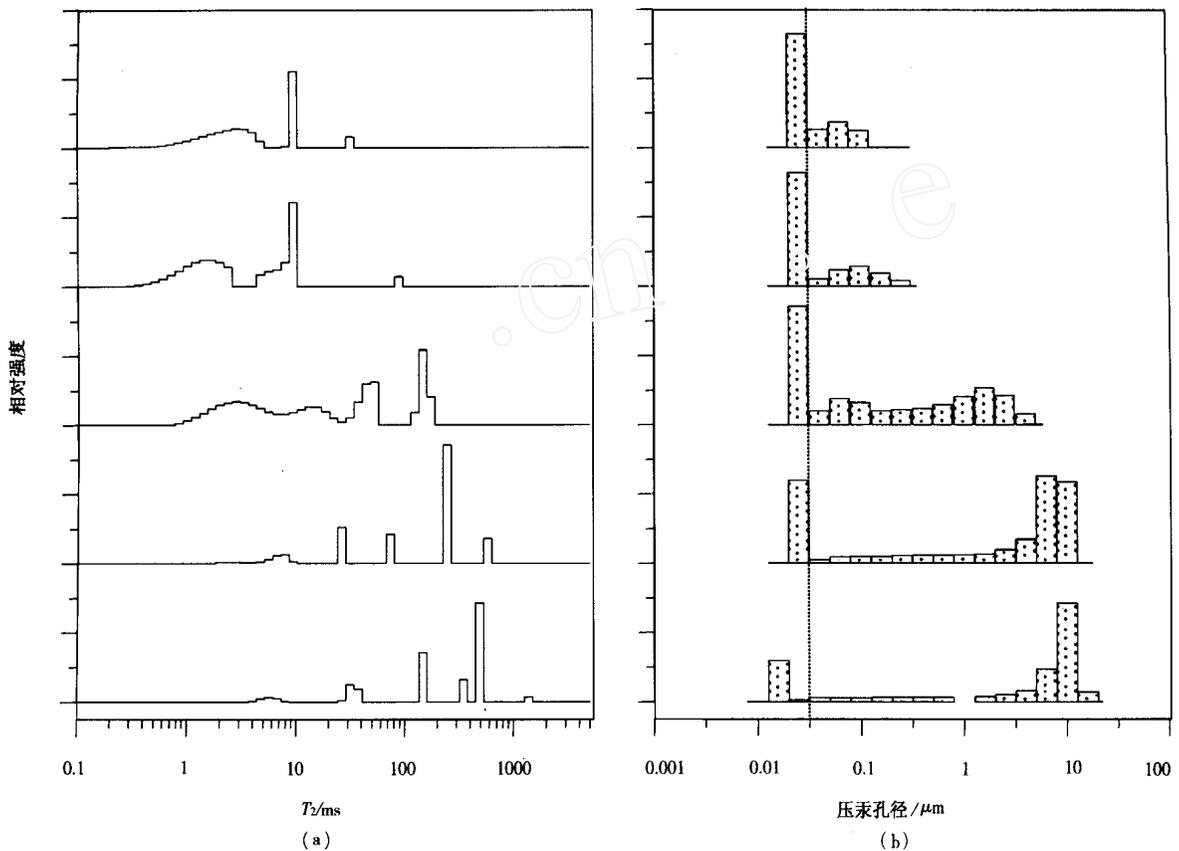


图3 压汞孔径分布直方图与高分辨率反演弛豫谱分布比较

(a) 高分辨率反演弛豫谱; (b) 压汞孔径分布直方图

表1 典型岩心实验室测量结果

岩心编号	孔隙率(%)	渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	压汞孔隙半径(μm)	最大汞饱和度(%)	备注
Zh59	23.84	673.365	8.5	82.3	高孔渗
Zh181	20.14	4.56	1.38	66.9	中等孔渗
Gu49	1.38	0.009	0.089	34.6	低孔渗

实际数据的高分辨率反演效果

核磁共振测井数据来自X井MRL-P核磁共

振成像测井测量结果,具体测量参数设置如表2。在反演解释中,只利用长等待时间的回波数据。

在X井的核磁测井测量段,储层岩性为砂泥岩,其中上段岩性较致密,泥质含量很高,毛管束缚

表 2 X 井 MRL-P 核磁测井测量参数

测量方式	长等待时间 m s	短等待时间 m s	回波数	回波间隔 m s
双等待	14595	1045	400	1.2

水含量较高, 孔隙率低, 渗透率较低。下段地层孔隙率较高, 岩石颗粒较大, 泥质含量很低, 束缚水含量低, 渗透率高, 自由流体孔隙率高达 8% ~ 18%。已有的核磁数据处理结果认为该段自由流体以油为主, 气少量, 不含水, 其中油的 T_2 约为 300ms, 气的 T_2 近似为 45ms。

图 4 是核磁共振测井上段部分数据分别采用常规方法和高分辨率反演方法得到的反演结果。从图中可见, 在该解释井段, 采用常规方法和高分辨率反演方法获得的核磁测井数据的弛豫谱弛豫时间基本小于 33ms, 说明在该井段流体确实以束缚水形式存在, 与岩性分析的结果一致。但与常规反演方法相比, 高分辨率反演方法的弛豫谱分布相对窄, 且谱的弛豫时间在总体上要大于常规方法估计的谱弛豫时间。需要指出的是, 在图 4a 所示的常规反演结果中出现了图 4b 所示的高分辨率反演结果里没有的较长弛豫时间的组分, 具体原因尚待结合具体的岩心数据分析。

图 5 是该井核磁测井数据下段的一个处理结果。从图 5a 中可见, 在整个解释井段, 弛豫时间在

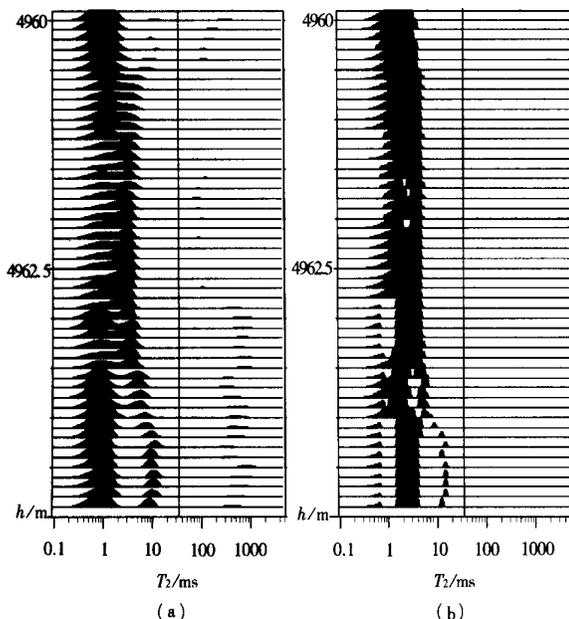


图 4 X 井上段反演结果(图中竖实线为默认的 33ms 孔隙束缚水弛豫时间截止值)

(a) 常规反演方法; (b) 高分辨率反演方法

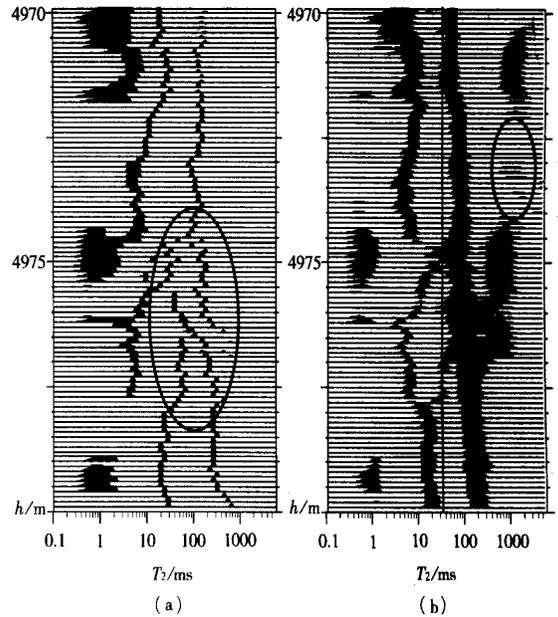


图 5 X 井下段反演结果

(a) 高分辨率反演方法; (b) 常规反演方法

200~ 300ms 的范围内, 有一条明显的较窄的谱连续带。根据对油弛豫时间的估计, 该谱带是油的弛豫显示。同时, 在图 5a 的圆圈中, 弛豫按照近三指数分布, 弛豫主要时间分别近似为 6ms, 45ms 与 250ms, 根据对油气弛豫特征和该段的岩性分析, 可能对应于束缚水、气和油, 而且气的比例较小。但在图 5b 中, 于解释井段的上部, 整个谱表现为以气弛豫为主, 甚至在圆圈所示的井段上几乎没有油的显示, 而在解释井段的下部, 可动流体的弛豫时间小于 200ms, 不容易将油、气在弛豫谱上分开。

结 论

本文介绍了高分辨率核磁共振测井数据弛豫谱反演技术, 并将其用于实际核磁共振数据反演。通过与常规弛豫谱反演结果以及岩心测量结果的对比, 可以发现高分辨率反演弛豫谱基本反映了岩心孔隙的分布, 同时, 该反演技术能更加精细地刻画出孔隙流体的弛豫分布, 实现真正意义的高分辨率弛豫谱反演。因此, 若将该高分辨率弛豫谱反演方法应用到核磁测井弛豫谱解释技术中, 将可能提高解释精度, 这些工作目前正在进行中。

参 考 文 献

[1] Kenyon W E. Petrophysical properties of application

- of NMR logging *The Log Analyst*, 1997, 38(2): 21~43
- [2] Prammer M G. NMR pore size distributions and permeability at the well site *SPE* 28368, 1994
- [3] 翁爱华, 李舟波等. 核磁共振测井数据高分辨率反演方法研究. 测井技术, 2002, 26(6): 455~459
- [4] Straley C, Rossini D, Vinegar H, Tutunjian P and Morris C. Core analysis by low-field NMR. *The Log Analyst*, 1997, 38(2): 84~95
- [5] Morriss C E, Deutch P, Freedman R, McKen D and Kleinberg R L. Operating guide for the combinable magnetic resonance tool *The Log Analyst*, 1996, 37

(6): 53~60

- [6] 徐士良编. FORTRAN 常用算法程序集(第二版). 北京: 清华大学出版社, 1995
- [7] 王国荣. 矩阵与算子广义逆. 北京: 科学出版社, 1994
- [8] 翁爱华. 核磁测井数据处理基础理论与实验研究. 吉林大学地球探测与信息技术学院博士论文, 2001
- [9] 翁爱华, 李舟波等. 核磁测井数据弛豫谱反演软件研究. 长春科技大学学报, 2001, 31(4): 395~397
- [10] 翁爱华, 李舟波等. 基于回归M-估计的核磁测井数据反演. 石油地球物理勘探, 2002, 37(3): 258~261

(本文编辑: 冯杏芝)

(上接第202页)

结 论

经过近几年攻关研究, 总结出了适合复杂地区模型约束的三维初至折射静校正技术, 该方法在解决西部复杂区山地三维静校正问题时, 取得了非常好的效果. 其主要技术思路是: 充分利用、分析表层调查和地面地质露头调查资料, 求取近地表低速层的速度和厚度, 初步建立合理的表层结构模型;

在初步的表层模型的基础上, 利用大炮初至折射静校正方法反演出更精确、合理的表层结构模型;

选择合理的填充速度、最终基准面或中间参考面, 计算最终静校正量.

参 考 文 献

- [1] 陆基孟主编. 地震勘探原理. 山东东营: 石油大学出版社, 1993
- [2] 周彬忠, 包吉山. 山区静校正问题分析. 石油地球物理勘探, 1986, 20(6) 1986
- [3] Mike Cox. *Static corrections for seismic reflection surveys*. Society of Exploration Geophysicists, 1999

(本文编辑: 冯杏芝)

· 外刊题录 ·

《石油物探》, Vol 42, No 1, 2003

- | | |
|--------------------------------|------|
| 曲网络伪谱法二维声波模拟 | 赵景霞等 |
| 并行交错网格法地震层析成像 | 赵连锋等 |
| 互相关特征参数分析法——一种叠前地震数据处理中有效的分析工具 | 高少武等 |
| 共聚焦点偏移成像方法研究 | 李振春等 |
| 多渠道数据融合及其应用 | 石玉梅等 |
| 共反射面与共中心点联合叠加成像 | 韩立国等 |
| 基于Born/Rytov近似的联合叠前深度偏移方法 | 丁伟等 |
| 井中震电勘探模型实验研究 | 陈本池等 |
| 灵活二维观测系统设计及其应用 | 潘文锋等 |
| VSP转换波成像技术及实例分析 | 张卫红等 |
| 塔中地区火成岩特征及其石油地质意义 | 苒衡等 |
| 地质雷达技术在表层地震地质条件调查中的应用 | 王建民等 |
| 地质雷达技术在表层结构调查中的应用与研究 | 谭绍泉等 |
| 叠前深度偏移技术在潜山油藏勘探中的应用 | 刘福贵等 |
| 叠前深度偏移在复杂地区的应用 | 方伍宝等 |

- | | |
|------------------------|------|
| 地震属性分析技术在子实油田开发中的应用 | 谢东等 |
| 利用地震波主参数预测岩性和油气 | 刘其等 |
| 地震属性参数在安棚深层系储层预测中的应用 | 钟俊义等 |
| 吸收系数反演在川东碳酸盐岩储层预测中的应用 | 黄花香等 |
| 合肥盆地复杂地表地震资料处理方法研究 | 华勇等 |
| 地震资料处理中随机干扰消除方法分析 | 夏洪瑞等 |
| 频率域地表一致性反褶积方法及应用效果分析 | 郭树祥等 |
| 速度异常分析与构造成图技术研究 | 王玉梅等 |
| 依据二维叠偏剖面编制构造图的空校原理 | 臧明福等 |
| 利用核磁共振测井技术识别松南Q地区低阻油气层 | 李万才等 |
| 利用测井资料预测塔河油田地层破裂压力 | 徐文梅 |
| 水泥胶结测井在开窗侧钻井中的应用与评价 | 李甲 |
| 煤层气地球物理测井技术发展综述 | 王敦则等 |
| 数据银行技术分析 | 王于静等 |
| 知识管理: 提高石油勘探决策水平的战略途径 | 杨红霞 |

作者介绍

吕淑然 高级工程师, 1964年生; 1987年毕业于唐山工程技术学院采矿专业, 1990年获昆明理工大学岩石力学专业硕士学位。一直从事爆破理论及应用研究工作, 发表论文多篇。现在北京理工大学机电工程学院工程力学专业攻读博士学位, 研究方向为爆破理论及其应用。

段卫星 高级工程师, 1964年生; 1984年毕业于合肥工业大学地质专业, 获学士学位, 现在中国海洋大学地球科学学院攻读博士学位。一直从事野外地震资料采集和处理方法研究工作, 参加并主持过多项部、局级科研课题。现在胜利油田物探公司地震勘探研究所工作。

白旭明 高级工程师, 1969年生; 1991年毕业于石油大学物探专业, 获学士学位。主要从事静校正、地震野外采集技术等方面的研究工作。现在东方地球物理勘探公司东部勘探事业部华北地区经理部工作。

王永刚 教授, 1951年生; 1975年毕业于华东石油学院物探专业, 并留校任教。一直从事开发地震、综合勘探和地球物理资料综合解释等方面的教学和科研工作, 发表论文多篇, 主持并参加过20多个科研项目。

孙鹏远 1975年生; 2001年获吉林大学地球探测与信息技术专业硕士学位, 现在吉林大学攻读博士学位。主要从事地震波场正演模拟、AVO正反演理论和方法等的研究工作。

康冶 高级工程师, 1968年生; 1990年毕业于大庆石油学院勘探系物探专业。现在大庆油田勘探开发研究院从事地震资料处理、解释及方法研究。

王成祥 博士后, 1970年生; 1999年获成都理工大学地球探测与信息技术专业博士学位; 2002年由中国科学院数学与系统科学研究院博士后流动站出站。现在东方地球物理公司研究院从事以波动方程叠前深度偏移为主的方法研究和软件开发工作。

倪逸 高级工程师, 特聘专家, 1964年生; 1990年毕业于青岛海洋大学应用地球物理专业, 获硕士学位, 1999年毕业于清华大学工程力学系, 获力学专业博士学位。曾从事解释方法研究与软件开发工作, 现在东方地球物理公司研究院研发中心从事叠前深度偏移和叠前反演方法研究以及GeoModel地震成像系统软件开发工作。

薛冈 1971年生, 1992年分配到南京石油物探研究所工作, 为2001年南京大学在职博士研究生。

李振春 博士, 1963年生; 1983年毕业于华东石油学院, 2002年获同济大学理学博士学位。曾提出多道集偏移速度建模方法, 发表论文多篇。现在石油大学(华东)地球资源与信息学院从事教学及地震成像、偏移速度分析、正反演理论与方法及开发地震理论与方法的研究及应用工作。

吴义杰 高级工程师, 1962年生; 1983年毕业于江汉石油学

院应用地球物理专业, 获工学学士学位。1984~1993年在中国石油天然气总公司江苏油田南京物探技术研究院从事科研和油气勘探生产工作。1997年在石油大学(北京)获硕士学位, 2001年在中国地质大学(北京)获博士学位。参与并主持过多项科研工作, 在国内外刊物上发表论文和译文多篇。

张光莹 博士研究生, 1973年生; 1999年毕业于国防科学技术大学应用物理系, 曾参加自然科学基金项目“裂缝岩石中非均匀力学性质的研究”及“用地震方法确定具有多尺度的分布裂缝介质中的流动特性”的研究。主要从事弹性波在复杂介质中传播的研究。

魏红梅 工程师, 1970年生; 1992年毕业于江汉石油学院物探专业; 现在胜利油田物探研究院从事地震、地质综合研究工作。

石好果 工程师, 1967年生; 1991年毕业于成都地质学院石油地质专业, 江汉石油学院在职硕士, 目前在胜利油田物探研究院从事地震资料解释工作。

李培明 工程师, 1968年生; 现正在成都理工大学攻读硕士学位; 一直从事物探资料的解释研究工作, 承担过多项油藏预测的科研课题; 现在胜利油田物探研究院从事解释工作。

孙岩 高级工程师, 1962年生; 1988年毕业于长春地质学院石油物探专业。一直从事地震资料解释和石油地质综合研究工作。现在中国矿业大学(北京)攻读博士学位。

方立敏 高级工程师, 1969年生; 现在大庆油田有限责任公司勘探分公司工作, 在读博士。

李洪革 高级工程师, 1967年生; 1997年毕业于石油大学(北京)地球科学系并获硕士学位, 现为地质大学(北京)在职博士生, 主要从事地震资料综合解释及含油气盆地综合研究等工作。

李培明 高级工程师, 1966年生; 1989年毕业于同济大学海洋系物探专业, 1994年获同济大学理学硕士学位。现在中国石油集团东方地球物理公司从事地震资料采集、处理与静校正等方面的研究工作。

胡鹏飞 高级工程师, 1963年生; 1984年毕业于长春地质学院应用地球物理系, 获学士学位; 现在新星西北分公司规划设计研究院从事地震数据处理和方法研究工作, 发表学术论文多篇。

翁爱华 讲师, 1969年生; 2001年获吉林大学应用地球物理专业博士学位。发表论文多篇, 现在吉林大学地球探测科学与技术学院从事核磁测井与地面核磁共振理论的教学与科研工作。

杨辉 博士后, 1961年生; 2000年毕业于同济大学海洋地质专业, 获博士学位, 现在石油大学(北京)博士后流动站从事综合地球物理研究。

S/N ratio data in this region, the processing procedure of seismic data with low S/N ratio built up in WGC batch software platform is difficult to meet the needs of exploration and development. So, in 1999 a set of perfect precessing methods for seismic data with low S/N ratio has been developed through the full use of flexible and convenient interactive tools of FOCUS processing software and management of data base in the platform of imported FOCUS interactive processing software, and achieved good results in application of real data processing. The paper briefly introduced the concrete processing techniques adopted in solving seismic data with low S/N ratio and the achieved preliminary results in order to make the processing level of seismic data with low S/N ratio in a condition of complicated surface get raise together.

Key words: low S/N ratio, surface static correction, refraction static correction, imaging, migration
Hu Pengfei, GR I, Institute of Designing and Programming, Northwest Bureau of Petroleum, Urumqi City, Xinjiang Uygur Autonomous Region, 830011, China

High-resolution inversion and its application in nuclear magnetic resonance (NMR) logging data processing **Weng Aihua, Li Zhoubo, Lu Jingan and Mo Xiwen**. OGP, 2003, 38(2): 208~ 212

The paper mainly discussed the applied effects of high-resolution inversion of relaxation spectrum in nuclear magnetic resonance (NMR) logging data. First, the paper introduced the principle of the method, discussed the influence of sample interval of relaxation spectrum in the method and compared the method's result with the result from core mercury injection. Then, the high-resolution inversion is applied to real NMR logging data which come

from two layers containing high and low shale content separately in a same borehole. It can be found from comparison with ordinary inversion result of relaxation spectrum that the high-resolution inversion of relaxation spectrum can give more detail of pure fluid relaxation distribution behind the echo trains, resulted in true high-resolution relaxation spectrum.

Key words: NMR logging, high-resolution, inversion of relaxation spectrum

Weng Aihua, Department of Applied Geophysics, Jilin University, Changchun City, Jilin Province, 130026, China

2-D inversion of magnetotelluric (MT) multi-parameters with topography using fast simulated annealing **Yang Hui, Wang Yongtao, Dai Shikun and Zhang Linbin**. OGP, 2003, 38(2): 213~ 217

Fast simulated annealing arithmetic is adopted to realize 2-D non-linear constrained inversion of MT data with uneven topography. Theoretic model test showed the correctness and effectiveness of the method. The inversion has been performed for real data on line CEMP 268 in Yiqikelike region in a constraint of a priori knowledge such as borehole and seismic data etc., supplementing the shortage of drilling and seismic data and providing the thickness and distribution of Mesozoic layer—important source rock and reservoir of the region, which provided an important basic data for geologist.

Key words: MT, multi-parameters, simulated annealing, constrained inversion

Yang Hui, CNPC Key Geophysical Laboratory, China University of Petroleum, Beijing City, 100083, China