

基于回归M-估计的核磁测井数据反演

翁爱华* 李舟波 王雪秋 陆敬安 莫修文

(吉林大学地球探测与信息技术学院)

摘 要

翁爱华, 李舟波, 王雪秋, 陆敬安, 莫修文. 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

通过对核磁共振测井数据分析, 发现数据误差可能不服从正态 Gauss 分布, 为此采用回归M-估计(RME)进行弛豫谱反演, 克服常规正则化反演弛豫谱受非 Gauss 分布数据误差的影响. 回归M-估计通过对较大的离群数据误差赋较小权, 对较小的数据误差赋较大权, 从而压制较大数据误差对总误差的影响, 并通过迭代过程进一步克服非 Gauss 分布数据误差对弛豫谱反演的影响. 在核磁测井数据反演中, 首先采用回归M-估计求取经过初步修正的误差数据集, 接着利用正则化方法对修正后的误差数据进行弛豫谱反演计算. 实际观测数据计算表明, 回归M-估计和常规正则化反演方法结合, 能提高弛豫谱估计精度和孔隙率计算效果.

关键词 核磁测井 非 Gauss 误差 回归M-估计 弛豫谱反演

ABSTRACT

Weng Aihua, Li Zhoubo, Wang Xueqiu, Lu Jingan and Mo Xiwen. Inversion of nuclear magnetic resonance logging data based on regression M-estimation. OGP, 2002, 37(3): 258~ 261

After analysis of real nuclear magnetic resonance logging data, it is found that some data error might not follow a normal Gauss distribution. Therefore, a regression M-estimation (RME) was applied to relaxation spectra inversion, overcoming the effect of non-Gaussian distribution data error on the relaxation spectra resulted from ordinary regularization inversion method. The regression M-estimation suppressed the effect of large data errors on total errors by taking small right in large off-group data errors and large right in small data errors and this influence can be further overcome by an iterative regression process. In the inversion of nuclear magnetic resonance logging data, first step is using RME to calculate error data set being preliminary modified, then using ordinary regularization method for relaxation spectra inversion in modified error data. The results of real data calculation show that combining RME with ordinary regularization inversion can improve the precision of relaxation spectra and the effect of calculated porosity.

Key words: nuclear magnetic resonance logging, non-Gaussian error, regression M-estimation, relaxation spectra inversion

引 言

核磁测井数据的弛豫(T_2)谱反演, 通常采用基于最小二乘原理的正则化方法(Kroeker等, 1986;

Munn等, 1987; Gallegos等, 1988; Whittall等, 1989)。这种方法要求观测数据的误差服从 Gauss 分布, 即数据的方差较小, 数据分布范围较窄. 但随着核磁测井仪器的发展, 出现高速核磁测井技术(Petricola 和 Troussaut, 1999; McKeon, 1999), 信号的叠加次数

* Weng Aihua, Institute of Earth Survey and Information Technology, Jilin University, Changchun City, Jilin Province, 130026, China
本文于2001年8月28日收到, 修改稿于2002年4月16日收到。
本文属国家自然科学基金资助项目(No: 49874028)。

减少到 3~ 5 次。同时,在快速连续测井时,探测区域在数据采集过程中发生变化,数据噪声源发生不确定性变化,这不仅导致信号的信噪比降低,还有可能使数据噪声模型不遵从 Gauss 分布。通过对已有的核磁测井观测数据采用正态概率分布曲线研究发现,这些数据中确实存在非 Gauss 分布的数据。

William (1988) 指出,对于误差非 Gauss 分布的数据,采用基于误差 Gauss 分布的最小二乘方法给出的参数估计不正确。为了消除离群的非 Gauss 数据误差对弛豫(T_2)谱反演的影响,应该采用稳健的参数反演方法。回归M-估计(Regression M-Estimation)是一种简单有效的稳健参数估计方法,在地磁测深转换函数(Egbert 等, 1986)、功率谱估计(Chave 等, 1987)、大地电磁测深张量阻抗估计(李桐林等, 1999)等方面得到成功应用。本文首先验证了部分核磁测井数据误差可能不服从正态 Gauss 分布,接着讨论了回归M-估计原理及其在核磁测井数据处理中的具体实现方法,最后给出了实际数据的计算结果。

核磁测井数据误差正态分布假设检验

检验数据谱是否遵从 Gauss 分布可采用正态概率曲线(Q-Q 曲线)进行研究,该曲线是由实际数据误差分布与期望的 Gauss 分布误差交会得到的(Egbert 和Booker, 1986;William, 1988)。若观测数据误差遵从 Gauss 分布,Q-Q 交会图表现为一条过坐标原点的单位斜率的近似直线。为了检验核磁测井数据误差正态分布的假设,采用 Eidesmo 等(1996)的两个实际测量的核磁回波(FD)数据进行误差 Gauss 分布检验。检验结果表明,在信噪比较高时,实际测量的核磁数据误差可能遵从 Gauss 分布(图 1),图中数据信噪比为 20。在图 2 中,数据信噪比较低,为 8,其 Q-Q 交会曲线不是一条过原点的单位斜率直线。因此,其数据误差不是 Gauss 分布,即在信噪比较低时核磁测井数据误差正态分布的假设可能不成立。

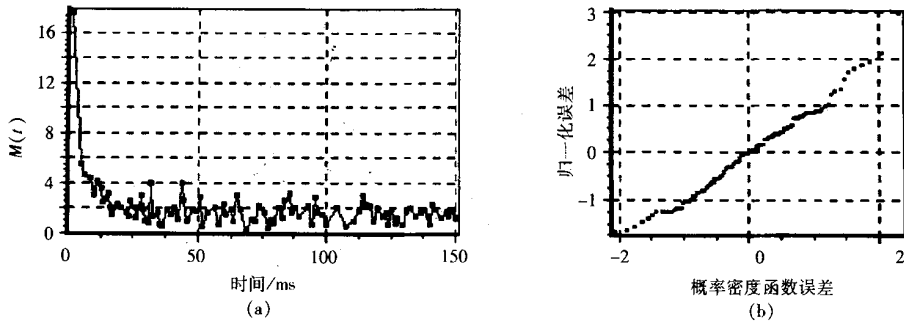


图 1 较高信噪比实测核磁数据(a)和误差 Gauss 分布 Q-Q 交会图(b)

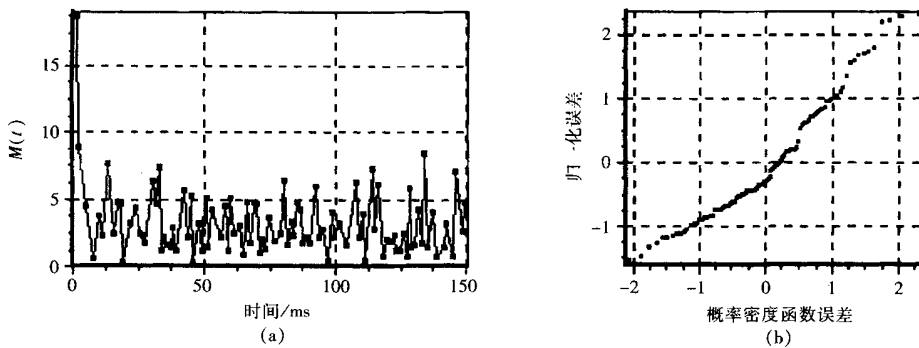


图 2 较低信噪比实测核磁数据(a)和误差 Gauss 分布 Q-Q 交会图(b)

核磁数据弛豫谱最小二乘反演

对于较为复杂的岩石孔隙系统,观测到的弛豫

信号 $M(t)$ 与弛豫时间谱 $P(T_2)$ 满足如下的积分关系(Kenyon, 1996)

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

式中: $P(T_2)$ 是相应于 T_2 弛豫组分的相对比例, 称为 T_2 -谱; $T_{2,\min}, T_{2,\max}$ 是测量的自由感应衰减信号所能分辨的最短与最长弛豫时间 (Morris 等, 1996)。为了求出 $P(T_2)$, 对式(1)离散化并采用模型限制的正则化方法进行反演 (Prammer, 1994; 翁爱华, 2001), 即

$$\min: y - Ax^2 + \alpha^2 Wx^2 \quad (2)$$

满足 $x_i \geq 0$

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, $y_i = M(t_i)$; α^2 称为正则化因子; W 是体积为 $K \times N$ 的模型约束条件矩阵 (Gallegos, 1988)。

回归M-估计方法原理及实现

回归M-估计原理

回归M-估计的基本原理是变权, 通过迭代逐步修改较大误差的数据, 使离群的数据误差逐渐减小, 从而使数据总误差减小, 达到压制非 Gauss 数据误差对参数估计的影响, 为此将式(2)中的优化问题改为如下形式更为一般的极值优化问题

$$\min: \rho \left(\frac{y_i - A^T x}{\sigma} \right) \quad (3)$$

式中: $\rho(r)$ 称为损失函数, r 为用数据方差归一化的数据误差; σ 是与数据误差方差有关的比例参数。用式(3)对未知向量 x 求导, 得到最优解满足如下的线性方程组

$$\Psi \left(\frac{y_i - A^T x}{\sigma} \right) A_i = 0 \quad (4)$$

式中 $\Psi(r) = \rho'(r)$ 。

为了能够压制非 Gauss 分布数据误差的影响, 必须选用合适的损失函数。本文选用如下的损失函数 (Egbert 等, 1986)

$$\rho(r) = \begin{cases} r^2/2 & |r| \leq r_0 \\ r_0|r| - r_0^2/2 & |r| > r_0 \end{cases} \quad (5)$$

这里 $r_0 = 1.5$, 对应于 95% 的置信度。定义权函数 $W(r)$ 如下

$$W(r) = \Psi(r)/r \quad (6)$$

则与式(5)对应的权函数为

$$W(r) = \begin{cases} 1 & |r| \leq r_0 \\ r_0/r & |r| > r_0 \end{cases} \quad (7)$$

这样, 与式(4)对应的优化问题可写成

$$\min: \sum_i W_i^2 r_i^2 \quad (8)$$

该优化问题与加权最小二乘相似。在极值问题式(8)中, 不同的数据误差对总误差的影响不同, 那些遵从 Gauss 分布的数据误差对总误差的贡献不受影响, 而那些离群的数据误差对总误差的影响将受到压制, 且偏离 Gauss 分布越远, 受到的压制也就越大, 从而对参数估计的影响也就更小。

回归M-估计实现

极值问题式(8)通过迭代方法很容易实现, 具体过程如下:

(1) 求出式(8)标准最小二乘估计 x_0 和标准方差 σ_0 ;

(2) 计算预测观测数据 y_0 和误差 r_0 , 即

$$y_0 = Ax_0; \quad r_0 = y - y_0 \quad (9)$$

(3) 修正观测数据

$$\bar{y} = y_{0i} + W(r_{0i}/\sigma_0) r_{0i} \quad (10)$$

(4) 用修正后的观测数据代替原来的观测数据, 并借助矩阵广义逆 (王国荣, 1994) 重新估计未知参数 x_0 和方差 σ_1 , 可表示为

$$\bar{y} \Rightarrow y; \quad x_0 = A^+ y \quad (11)$$

(5) 由方差计算比例参数 $\sigma_0 = \beta\sigma_1$, 当 $r_0 = 1.5$ 时, $\beta = 0.7784$ 。

重复步骤(2)~(5), 直到数据拟合差不再减小。

在理想情况下, 为了能完全压制离群误差数据的影响, 要求当 r 较大时, 对应的 $\Psi(r) \rightarrow 0$, 从而优化问题式(8)中大的数据残差能被完全忽略掉。为此, 在上述迭代收敛后, 采用如下权函数迭代 1~2 次

$$W(r) = \exp\left\{-\exp[r_0(|r| - r_0)]\right\} \quad (12)$$

式中 $r_0 = 2.8$ 。

回归M-估计在核磁测井数据反演中的应用

由于回归M-估计主要用于压制参数估计中非 Gauss 数据误差的影响, 通过迭代使离群数据误差减小, 数据误差的分布范围变小, 参数估计后总误差减小。为了在核磁测井弛豫谱分解中利用这一数据处理方法压制非 Gauss 数据误差分布, 可分两步进行: 首先对数据采用回归M-估计求取经过修正后的数据误差相对变小的误差数据集, 接着利用正则化

方法对修正后的误差数据进行连续谱反演计算。分两步完成核磁弛豫谱估计是因为采用 Prammer (1994) 提出的负值迭代消去方法估计连续非负谱的计算量在不作矩阵预处理时较大, 将其直接应用到回归M-估计的迭代过程中计算速度较慢。

图 3a 和图 3b 分别是图 1 与图 2 中原始 FD 在回归M-估计处理后, 利用正则化反演方法求取的连续弛豫谱。从图 3 可见, 虽然两者的信噪比相差较大

(一个为 20, 另一个为 8), 且图 2 中较低信噪比数据误差不服从正态 Gauss 分布, 并且在较长观测时间后仍不能衰减为 0, 即出现了基线偏离。但从图 3 可见, 在作回归M-估计处理后反演的弛豫谱基本一样, 且计算的孔隙率分别为 14.0% 和 11.3%, 都接近标准孔隙率 12.5%。而 Eidesmo 等 (1996) 采用常规计算方法得出图 2 中低信噪比数据的孔隙率为 6.1%, 远低于标准孔隙率。

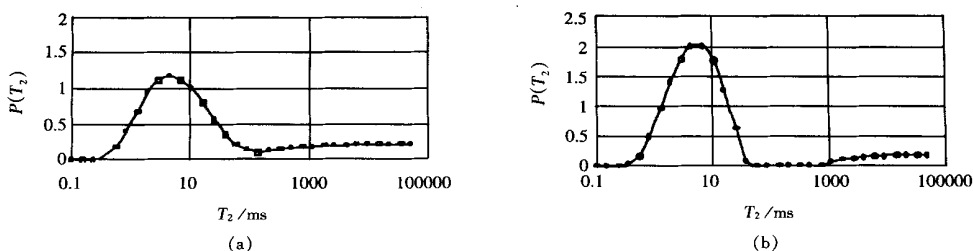


图 3 图 1a 和图 2b 中 FD 数据结合回归M-估计的弛豫谱反演结果

结 论

核磁测井数据弛豫谱反演是常规核磁测井处理的核心, 通过对实际数据研究可得到如下基本认识:

(1) 核磁测井数据在信噪比较低时, 其数据噪声可能不服从正态 Gauss 分布;

(2) 回归M-估计方法是一种比最小二乘法更为适用的参数估计技术;

(3) 采用回归M-估计方法并结合常规正则化反演技术, 能够获得比常规反演更精确的弛豫谱。

参 考 文 献

- [1] 李桐林, 翁爱华, 林君. 大地电磁测深抗稳健估计. 长春科技大学学报, 1999, 29(1): 81~ 83
- [2] 王国荣. 矩阵与算子广义逆. 科学出版社, 1994
- [3] 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, 2001 (博士论文)
- [4] William M 等著; 王明光, 楼海译. 地球物理数据分析——离散反演理论. 地质出版社, 1988
- [5] Chave A D, Thomson D J and Ander M E. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(81): 633~ 648
- [6] Egbert G D and Bookerr J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophys J R Astr*

Soc, 1986, 38(5): 826~ 844

- [7] Eidesmo T, Relling O M and Rueslatten H. NMR logging of mixed-wet north sea sandstone reservoirs. *SPWLA 37th*, 1996
- [8] Gallegos D P and Smith D M. A NMR technique for the analysis of pore structure: determination of continuous pore size distributions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1988, 122(1): 143~ 153
- [9] Kroeker R M and Henkelman R M. A analysis of biological NMR relaxation data with continuous distributions of relaxation times. *Journal of Magnetic Resonance*, 1986, 69: 218~ 235
- [10] Munn K and Smith D M. A NMR technique for the analysis of pore structure: numerical inversion of relaxation measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1987, 119(1): 117~ 126
- [11] McKen D, Minh C C, Freedman R, Harris R, Willis D, Dauies D, Gubelin G, Oldigs R and Hurlmann M. NMR tool designed for faster logging. *SPWLA 40th*, 1999
- [12] Morriss C E, Deutch P et al. Operating guide for the combinable magnetic resonance tool. *The Log Analyst*, 1996, 37(6): 53~ 60
- [13] Petricola M J and Troussant X. Applications of fast NMR logging in shaly gas-bearing sands invaded by oil filtrate. *SPWLA 40th*, 1999
- [14] Prammer M G. NMR pore size distributions and permeability at the well site. *SPE* 28368, 1994
- [15] Whittall K P and Mackey A L. Quantitative interpretation of NMR relaxation data. *Journal of Magnetic Resonance*, 1989, 84: 134~ 152

作者介绍

郭向宇 高级工程师, 1961年生, 1983年毕业于华东石油学院物探专业, 1997年于石油大学(北京)获硕士学位。一直从事地震资料处理方法研究工作, 发表学术论文多篇。现正在石油大学(北京)攻读博士学位。

张金强 工程师, 1970年生, 1991年毕业于石油大学(华东)地球物理勘探专业。现在中石化油田事业部勘探处从事油气勘探生产的管理工作。

陈爱新 博士后, 1970年生, 1999年于电子科技大学电磁场与微波技术专业获博士学位。现在北京航空航天大学电子工程系博士后流动站从事研究工作, 主要研究兴趣有非均匀介质中的场与波、电磁辐射与散射、电阻率成像测井、随钻电阻率测井数值分析等。

王成祥 工程师, 1970年生, 1992年毕业于成都地质学院石油物探专业, 1999年获地球探测与信息技术专业博士学位。一直从事地震资料处理和地球物理方法研究工作, 涉及小波变换、波动方程正演、旅行时反演等。目前主要从事波动方程叠前深度偏移及偏移速度分析研究工作。

王华忠 副教授, 1964年生, 分别于1991年和1997年获同济大学应用地球物理硕士和博士学位。曾提出优化系数的波动方程波场外推算子、动态规则法任意速度分布情况下三维地震波走时计算方法、炮点—全偏移距共方位角叠前深度偏移成像方法。现在同济大学海洋地质与地球物理系从事科研和教学工作。

刘财 教授, 1963年生, 1986年毕业于长春地质学院地球物理系, 1999年在长春科技大学获博士学位。自参加工作以来, 发表学术论文80余篇, 出版专著及参编教材多部; 主持和参与自然科学基金项目、省部级项目20余项, 获得各种级别的奖励多次。现在吉林大学地球探测科学与技术学院从事地球物理学的教学和科研工作, 并主管学院的科研和实验工作。

裴正林 高级工程师, 1962年生, 2000年毕业于中国地质大学(北京), 获地球探测与信息技术专业博士学位。负责并参预完成“八五”、“九五”两项国家科技攻关项目, 发表论文多篇。现在石油大学(北京)博士后流动站从事研究工作, 主要研究方向包括信号处理、小波变换、层析成像等。

肖建华 教授级高级工程师, 1962年生, 1982年毕业于中国矿业大学物探专业。曾从事微机现场数据处理、导波地震勘探、地震波各向异性理论等方面的研究。现在中煤第一勘探局主持地震勘探新技术研究, 同时在中国矿业大学(北京)做博士后研究。

李生杰 博士研究生, 1962年生, 2000年毕业于中国科学技

术大学地球物理专业, 获硕士学位。现在中国科技大学攻读地球物理专业博士学位, 研究方向为信号分析及岩石物性。

谭成仟 副教授, 1964年生, 1988年毕业于西安地质学院应用地球物理系, 获硕士学位。曾获省部级科技进步奖4次, 出版学术专著2部, 发表论文30余篇。现在西安石油学院石油工程系从事测井解释与油藏描述的教学和科研工作。

翁爱华 讲师, 1969年生, 2001年在吉林大学应用地球物理专业获博士学位。已发表论文多篇, 参加并完成国家自然科学基金项目一项。现从事核磁共振测井闪烁处理与解释、电磁法勘探等教学与科研工作。

苏朱刘 副教授, 1963年生, 2001年毕业于中国地质大学(武汉)地球探测与信息技术专业, 获博士学位。发表学术论文10余篇, 参加多项国家自然科学基金和省部级科研项目的工作。现从事非地震物探资料处理、综合解释、软件开发等方面的科研与教学工作。

王棣 高级工程师, 1969年生, 1990年毕业于石油大学物探专业, 1995年获石油大学应用地球物理专业硕士学位。一直从事地球物理方法研究和地震软件开发工作。现在胜利石油管理局物探研究院从事叠前深度偏移速度分析方法研究工作, 同时也在同济大学攻读博士学位。

云美厚 副教授, 1965年生, 2001年毕业于中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业, 获博士学位。发表学术论文20余篇。现在大庆石油学院从事教学与开发地震研究工作。

靳军 工程师, 1970年生, 1992年毕业于西南石油学院石油地质专业, 获学士学位。现在新疆油田公司从事地震资料解释与地质综合研究工作。

蔡先华 高级工程师, 1946年生, 1970年毕业于长春地质学院。现在华东石油局第六物探大队综合研究中心工作。

吕公河 高级工程师, 1963年生, 1984年毕业于长春地质学院石油物探专业, 1996年获得青岛海洋大学海洋地质专业理学硕士, 现在西安交通大学攻读工程力学博士学位。曾先后从事过高分辨率VSP、山地等地震勘探技术的研究工作, 有3项成果获得省部级奖励; 曾发表技术论文10余篇。现任胜利物探公司副总工程师兼地震勘探研究所所长。

王西文 高级工程师, 1956年生, 1982年毕业于西安地质学院, 1987年在该校硕士研究生毕业后留校任教, 1989年调入西北石油地质研究所, 1993年到日本作访问学者, 1997年进入中国科学院地球物理所攻读博士学位。现在中国石油勘探开发研究院西北分院地球物理研究所工作。