

核磁共振测井数据高分辨率反演方法研究^{*}

翁爱华 李舟波 莫修文 陆敬安

(吉林大学地球物理系·长春)

摘 要

翁爱华,李舟波,莫修文,陆敬安.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

将核磁共振测井回波数据反演为弛豫谱时通常采用梭状函数抽样方法。为了提高弛豫谱反演的分辨率,采用了阶梯函数对弛豫谱进行抽样离散,获得了与常规方法一样的线性方程组,并采用奇异值分解与投影迭代方法求解对应的非负约束的正则化问题。系数矩阵条件数与参数分辨率矩阵分析表明,阶梯函数抽样形成的线性方程组具有更高的稳定性和更好的参数分辨率。数值应用结果进一步验证了阶梯函数抽样方法在弛豫谱反演中的优越性。

关键词:核磁共振测井 弛豫谱 反演 阶梯函数 抽样 参数 分辨率 方程

ABSTRACT

Weng Aihua, Li Zhoubo, Mo Xiuwen, Lu Jingan. On High Resolution Inversion of NMR Logging Data. WLT, 2002, 26(6):455 - 459

Traditionally, comb function sampling method is used to get a linear equation set for T_2 distribution at discrete T_2 points when transforming NMR logging data into T_2 distribution. In the inversion technique presented here, to form a linear system of equations, T_2 distribution is parameterized by piecewise function over continuous sampling intervals. The elements of the coefficient matrix of the new linear system are calculated with Legendre-Gauss quadrature rule. And the linear system of equations, under the nonnegative and minimum energy constrains, is then solved by introducing a projection operator and singular value decomposition technique. Numerical results show that the new system is much more stable than traditional method. And the analysis of parameter resolution matrix of the two methods shows that the new method is of higher resolution than the old one. Inversion results of synthetic and real data are consistent with the above theoretical analysis.

Subjects: NMR logging relaxation spectra inversion piecewise function sampling
parameter resolution equation

前 言

对于孔隙大小为连续分布的储层,核磁共振测井观测到的自由感应衰减信号是孔隙相对大小决定的弛豫时间的连续分布函数,可以用第一类 Fredholm 积分方程表示。第一类 Fredholm 积分方程在本质上是解与不稳定的,但通常可采用离散化技术求取其离散意义的解^[1,2]。为克服其不稳定性,引入正则化技术^[3]。对第一类 Fredholm 积分方程的离散化在核磁共振测井解释

中通常都采用梭状函数抽样技术进行。梭状函数抽样方法简单,物理意义明显,且容易实现。Whitall 等^[4]在介绍核磁数据的弛豫谱反演时,指出可以利用阶梯函数对弛豫进行离散,同样可获得对第一类 Fredholm 积分方程的离散化相同形式的方程组,并给出了该方程组小二乘理论反演结果。

采用阶梯函数对弛豫谱进行离散,从表面上看,可能会对弛豫谱的分布起平均作用,因为某一待反演的弛豫组份此时将均匀分布于一个弛豫时间段内,从而将特定半径尺寸孔隙的组份比例平均化,因此反演结果可能相当的粗糙,并且当实际岩石孔隙大小均匀时,采用较大的弛豫时间步长离散,反演结果可能不能反映岩石孔

^{*}国家自然科学基金项目(No. 49874028)

隙真实相对大小。但是,在弛豫谱采样密度较大时,即阶梯函数采样步长较小,此时阶梯函数的平均作用在反演分辨率范围内是可以接受的。更重要的是,我们发现,相对梭状函数抽样,采用阶梯函数抽样得到的线性系统的矩阵条件数更小,因此反演过程更加稳定。而且在同样的弛豫谱采样密度条件下,阶梯函数抽样得到的线性系统参数分辨率更高。因此,研究采用阶梯函数抽样得到的核磁共振弛豫谱满足的线性方程的特征很有实际意义。本文首先采用阶梯函数对核磁共振测井中第一类 Fredholm 积分方程进行离散,接着比较分析了获得的矩阵方程稳定性与参数分辨率,最后用理论数据和实际数据对新方法的效果进行了验证。

基本理论

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^[5]

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

式中, T_{2min} 与 T_{2max} 是测量的自由感应衰减信号所能分辨的最长与最短弛豫时间,通常 $T_{2min} = 2 T_E$, $T_{2max} = 5\ 000\ ms$, T_E 为测量回波间隔^[6]。

通常,对弛豫谱 $P(T_2)$ 采用梭状函数进行离散化^[7],但文中采用阶梯函数对该弛豫谱进行离散,即令

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

式中, M 为抽样点个数,且

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

T_{2j} 为抽样点。把式(3)代入式(1)有

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

将时间 $y(t)$ 离散化,即 $y_i = y(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 从而有如下的矩阵方程

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

A 为 $N \times M$ 矩阵,其元素为

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

式(6)可采用五点 Legendre-Gauss 积分方法计算^[8]。对

于式(5),可求出最小二乘意义下的解。但由于原积分方程是病态的,通常认为离散得到的线性方程组也是奇异的,为此利用奇异值分解^[9],借助投影算子方法求解非负约束条件的正则化方程^[10,11]。

系数矩阵稳定性分析

从式(6)可见,系数矩阵不仅与观测时间有关,还与弛豫时间的离散化间隔有关。不难理解,过小的抽样间隔,导致阶梯抽样结果过度为梭状函数抽样结果。相反,过大的抽样间隔将减少回波数据所能分辨的弛豫谱组份。数值试验发现,对 MRIL-P 型核磁共振测井仪的观测参数,即 $T_E = 1.2\ ms$,回波个数 N 为 400,在反演中取 $T_{min} = 0.1\ ms$, $T_{2max} = 5\ 000\ ms$,弛豫谱 $P(T_2)$ 按照等对数间隔抽样,抽样间隔数从 32 增大到 64 都合理,文中取 64 作为抽样间隔数。为了讨论矩阵的稳定性,通常采用矩阵的条件数 $cond(A)$ 来衡量,其定义为^[11]

$$cond(A) = \frac{\lambda_1}{\lambda_m} \quad (7)$$

式中, λ_1 和 λ_m 分别为矩阵的最大与最小特征值。条件数越大,矩阵越接近奇异,对应的方程组解越不稳定。图 1 给出了阶梯函数与常规的梭状函数两种抽样方法得到的方程组系数矩阵奇异值比值 λ_1 / λ_m 随参数自由度的变化情况。

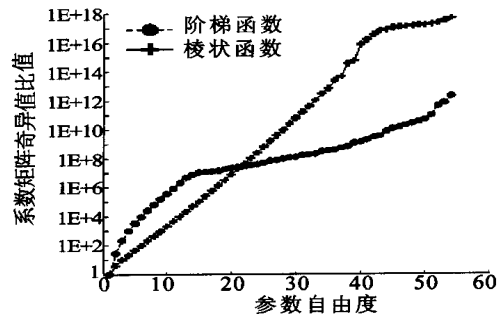


图 1 系数矩阵奇异值比值与参数自由度的变化规律

从图 1 可见,采用梭状函数与阶梯函数抽样得到的矩阵特征值比值随参数自由度变化规律是明显不同的。采用阶梯函数抽样得到的矩阵在参数自由度较大时,矩阵特征值比值远远小于梭状函数的情况。而且,阶梯函数离散得到的矩阵最小特征值大于 10^{-10} ,且矩阵的秩等于未知数的个数,按照杨文采的观点^[11],该矩阵在数值计算上是没有奇异性的。相反,对于常规的梭状函

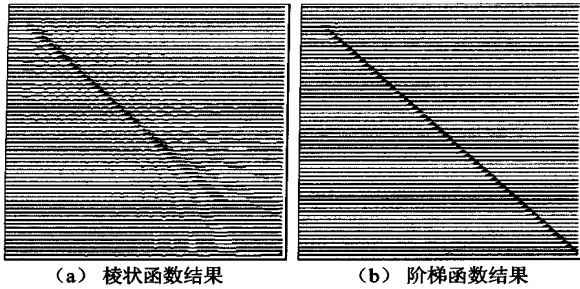


图 2 参数分辨率矩阵比较

数,情况明显不同,其矩阵特征值比值随参数自由度增加迅速增大,即其特征值随参数自由度的增大迅速减小。且在参数自由度较大时,其条件数远远小于阶梯函数的条件数。因此,在理论上阶梯函数抽样得到的矩阵在数值上是稳定的,而常规抽样得到的矩阵是不稳定的。

参数矩阵分辨率分析

对于好的反演技术,不仅要求反演的过程稳定,而且要求反演的参数分辨率较高。参数分辨率在线性反演技术中可通过参数分辨率矩阵 R 来认识,它可用系数矩阵 A 及其广义逆 A^+ 定义为^[1]

$$R = A^+ R \quad (8)$$

若估计参数向量为 \hat{x} ,真实参数模型向量为 x ,利用参数分辨率矩阵 R 有

$$\hat{x} = R x \quad (9)$$

显然,若 R 为单位矩阵,则估计的解就是真解。 R 越接近单位矩阵,估计参数的每个分量 \hat{x}_i 越接近真实模型参数对应的分量 x_i ,反演的参数分辨率高。反之,若 R 远偏离单位矩阵,则反演的参数分辨率降低,因为此时反演的参数不仅与真实参数有关,还与其它的真实模型参数有关,此时估计的解是真解的某种平均,平均效果与 R 的行向量有关。

图 2 比较了采用梳状函数与采用阶梯函数抽样获得的线性系统的参数分辨率矩阵。从图 2(a)可见,采用梳状函数抽样得到的参数分辨率矩阵,虽然在矩阵中间范围内各行对角占优,但展布较宽,因此,参数分辨率降低。同时,在这些行中出现的负值进一步降低了占优成份的分辨率。在其余各行向量几乎为 0,说明对应的真实模型参数很难被反演确定出来。总之,由于参数分辨率矩阵中部对应于中等弛豫速率的弛豫谱,常规弛豫谱

反演对过快或过慢的弛豫组份都不能很好地反演出来,除非观测时间无限长,回波间隔非常小。从图 2(b)可见,除了参数分辨率矩阵前面一些行参数分辨率较低外,在矩阵的其它行参数分辨率矩阵是完全对角占优的,且这种占优的展示范围非常窄,因此在理论上估计的谱参数分辨率很高。

反演结果

对上面获得的反演方法利用如下的理论模型对其反演效果进行检验

$$M(t) = 2.5e^{-\frac{t}{T_{21}}} + 5.0e^{-\frac{t}{T_{22}}} \quad (12)$$

式中, $T_{21} = 10 \text{ ms}$, $T_{22} = 50 \text{ ms}$ 。时间 t 从 1.2 ms 起以 1.2 ms 间隔采样 400 次。不同信噪比 (SNR) 的误差数据采用迭加 0 均值不同方差的正态随机 Gauss 误差方法合成。图 3 是用阶梯函数和梳状函数两种抽样方法获得的线性系统反演结果。图 3 中 FI 表示反演的弛豫谱(积分)和,理论上它应该为 7.5。从图 3 可见,无论在谱的分布还是孔隙度评价精度上,两者此时都能给出理论模型的真实参数。

图 4 是理论数据加噪后在 SNR 分别为 14.7 与 31.0 时两种方法的反演结果。图 4 中左栏数据 $SNR = 31$,右栏数据 $SNR = 14.7$,上排两图为梳状函数反演结果,下排两图为阶梯函数反演结果。从图 4 可见,在数据信噪比不同时,两种方法反演获得的孔隙度(谱积分和)一致,但由阶梯函数抽样得到的方程组反演获得的弛豫谱分辨率明显大于梳状函数方法的结果,这种优势在弛豫时间较大时尤其明显。对于较小的弛豫时间,两者的分辨率都不是太好。这是由于两者对快弛豫组份

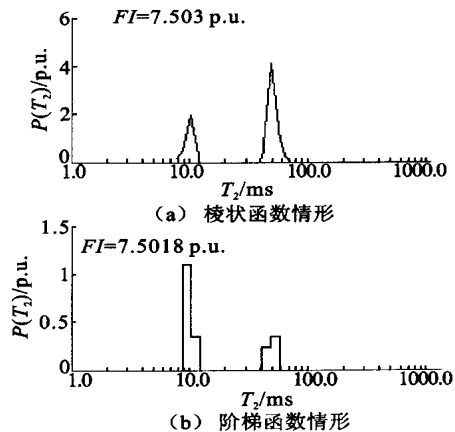


图 3 理论数据采用梳状函数和阶梯函数抽样的反演结果

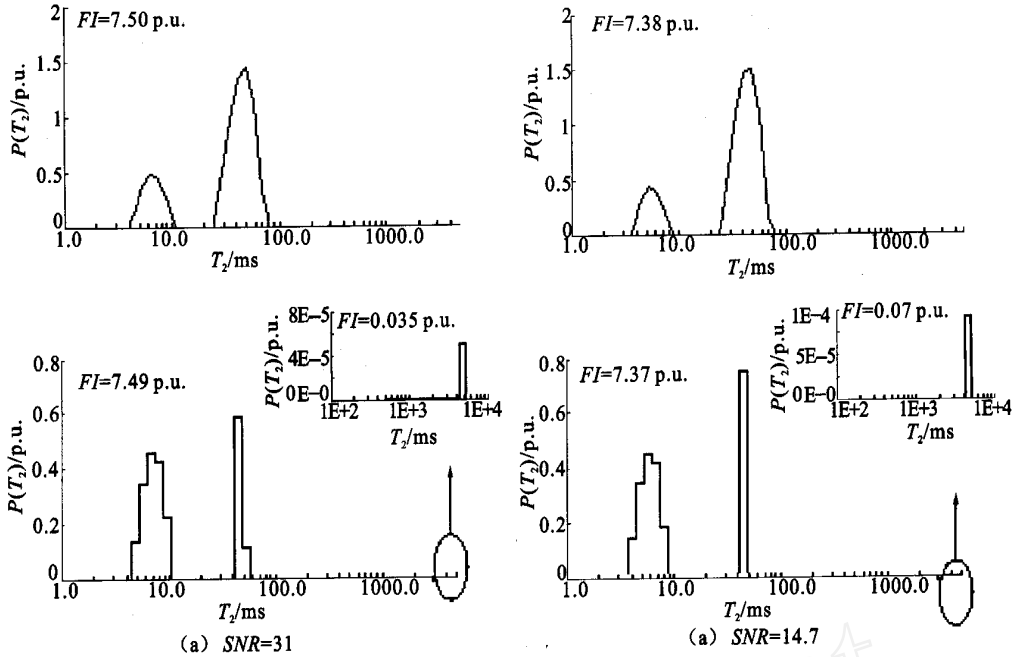


图4 加不同水平噪声的理论数据反演结果

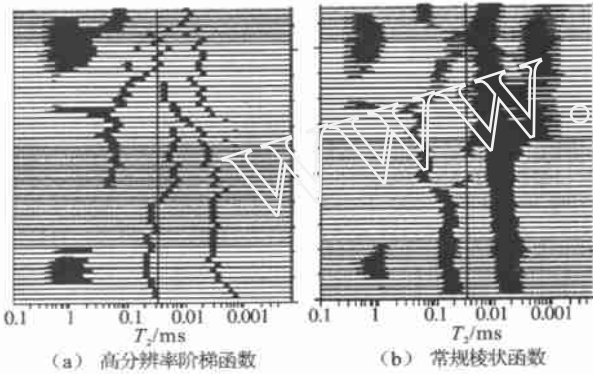


图5 x井段的核磁共振数据反演结果

的分辨率都较低有关。但此时阶梯抽样方法仍然好于梭状函数方法,表现在谱相对窄且更接近真实的谱分布。这和前面参数矩阵分辨率的分析是一致的。

图5是某井段实际核磁测井数据的处理结果。核磁数据来自MRIL-P仪器测量结果。该井段地层孔隙度较高,岩石颗粒较大,渗透率高,同时,泥质含量较低,故束缚水含量低,自由流体孔隙度高达8%~18%。已有的核磁共振数据处理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5(a)是高分辨率反演方法的反演结果,图5(b)是常规方法反演得到的弛豫谱。从图5(a)可见,在整个解释井段,在弛豫时间200~300ms的范围内,有1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5(a)中上段流体弛

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,对应于束缚水、气和油,而且气的比例较小。但在图5(b)中,总体上反演的弛豫谱分辨率不高,谱明显加宽。同时,虽然可将油气在弛豫谱上区分出来,但对应的弛豫时间与实际相差较大。在解释井段,气的弛豫时间明显大于45ms,而油的弛豫时间或小于200ms或远大于300ms。因此,常规反演方法不容易将油气在弛豫谱上的位置较精确地标定出来。

结 论

1. 新的线性系统方程矩阵条件数在参数自由度较大时远远小于常规方法的矩阵条件数,在数值精度之内,甚至可以认为该矩阵方程是非奇异的。因此,新的方法获得的线性系统在参数自由度较大时是稳定的。

2. 参数分辨率分析表明,采用阶梯函数抽样比梭状函数抽样方法得到的方程其参数矩阵分辨率在弛豫时间较大要高且稳定很多,但在弛豫时间较小时,参数分辨率较低,甚至在很小的弛豫时间上无法分辨出弛豫组份,这是由于太快的弛豫速率组份在给定的回波间隔时不能分辨出该弛豫组份。

该研究的意义在于对于混质含量较少的含油气砂岩,采用阶梯函数离散化技术可得到更高分辨率与更稳定的谱分布,为采用谱法进行油气识别提供有效的数学

分析手段;对于时间域数据分析也会有较大的帮助,因为较慢的油气弛豫在新的反演方法中更容易被稳定精确地识别出来。

参 考 文 献

- [1] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法. 北京:地质出版社, 1997
- [2] 赫尔曼 G T, 图伊 H K 等编著, 黄联捷, 李幼铭等译. 层析成像和反演问题的基本方法, 北京:石油工业出版社, 1997
- [3] Kroeker R M and Henkelman R M, Analysis of Biological NMR Relaxation Data with Continuous Distributions of Relaxation Times. *Journal of Magnetic Resonance*, 1986, 69(1): 218 - 235
- [4] Whittall K P and Mackey A L. Quantitative interpretation of NMR Relaxation Data, *Journal of Magnetic Resonance*, 1989, 84(1): 134 - 152
- [5] Straley C Rossini D D, Vinegar H, Tutunjian R and Morriss C. Core Analysis by Low-field NMR. *The Log Analyst*, 1997, 38(2): 84 - 95
- [6] Morriss C E, Deutch P, Freedman R, Mc Ken D and Kleinberg R L. Operating Guide for the Combinable Magnetic Resonance Tool. *The Log Analyst*, 1996, 37(6): 53 - 60
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 王国荣. 矩阵与算子广义逆. 北京:科学出版社, 1994
- [10] Prammer M G. NMR Pore Size Distributions and Permeability at the Well Site. 1994, SPE 28368
- [11] 翁爱华. 核磁测井数据处理基础理论与实验研究 [博士论文]. 长春:吉林大学地球探测与信息技术学院, 2001

(修改稿收稿日期:2002 06 03 本文编辑 李总南)

2002 年《测井技术》稿件刊用统计

1. 统计以 2002 年在《测井技术》第 1 期至第 6 期上已经发表的正式论文为统计数,消息、简讯等不在统计之列;
2. 统计数据以第一作者单位为统计源;
3. 《测井技术》截止到 2002 年 11 月底共收到论文稿件 271 篇,正式刊用 131 篇,刊发率为 48.5 %;
4. 附表排列顺序以论文的正式刊发先后为序。

单位	数量	单位	数量	单位	数量
胜利石油管理局	2	四川石油管理局测井公司	5	中国海洋石油测井公司	1
中油国际工程公司	2	中科院长沙大地构造研究所	1	中国矿业大学	1
中油股份公司勘探与生产分公司	1	西安石油学院	2	中国新星石油公司华北石油局数字测井站	1
中国石油新疆油田分公司	1	胜利油田地质科学研究所	2	中原油田采油工程事业部	1
胜利石油管理局测井公司	3	大庆石油勘探局测井工程处	1	大庆射孔弹厂	1
中国石油大学	19	华北油田测井公司	4	中油测井技术服务有限公司	1
吉林大学	3	江苏大学	2	青海油田分公司	1
大庆油田测井公司	2	中原油田测井公司	1	中国石油勘探开发科学研究院	1
山东大学	1	大港油田钻采工艺研究院	1	西南石油局测井公司	2
中国地质大学	5	武汉华中科技大学	1	大庆油田勘探分公司	1
河南油田测井公司	5	清华大学	1	中国科学技术大学	1
大港油田集团测井公司	2	上海师范大学	1	中原油田采油二厂	1
华油测井公司廊坊分公司	1	哈尔滨工业大学	1	大庆油田公司第六采油厂	1
大庆油田测试技术服务公司	7	大港油田油气勘探开发技术研究中心	1	中石化河南油田分公司采油一厂	1
吐哈油田录测井公司	3	大庆油田勘探开发研究院	1	华中科技大学	1
胜利油田现河采油厂	1	胜利石油公司勘探监理部	1	中国人民解放军第四军医大学	1
西安石油勘探仪器总厂	7	中原油田采油工程技术研究院	1	中国新星石油公司华北石油局规划院	1
胜利油田河口采油厂监测大队	1	吉林石油集团公司测井公司	3	大庆石油学院	1
大庆油田试油试采分公司	1	冀东油田勘探开发工程监理单位	1	中原油田分公司勘探开发科学研究院	1
江汉石油学院	1	北京大学	1	中原油田分公司工程监督中心	1
江汉测井研究所	3	塔里木油田分公司	1		
华北油田研究院	3	江苏石油勘探局地质测井处	1		
北京航空航天大学	1	中原油田分公司采油六厂	1	总计	131

作者简介

- 时鹏程** 工程师,1993年毕业于成都理工学院石油系。主要从事M/LWD的技术服务与研发工作。接受过Schlumberger的M/LWD培训。曾任BGTC塔里木作业区基地经理、随钻测井作业部经理、集团公司重点科技攻关项目地质导向技术研究技术总体组成员、03专题长。(地址:北京石景山京原路3号中油测井有限责任公司 邮编:100043 电话:13501197218)
- 柯式镇** 副教授,1967年生。1989年毕业于石油大学(华东)矿场地球物理专业。1992年获应用地球物理硕士学位;1999年获应用地球物理博士学位。现在石油大学(北京)资源与信息学院工作。(地址:北京市昌平区水库路石油大学资源与信息学院测井教研室 邮编:102200 电话:010 89733317)
- 翁爱华** 讲师,1969年生。2001年获吉林大学博士学位。现为吉林大学地球探测与信息技术学院讲师。从事核磁测井与核磁共振理论研究。(E-mail:wengaihua@yahoo.com.cn 电话:0431-7691147)
- 法林** 高级工程师,1955年生。1982年毕业于山东大学物理系。SEG,UFC会员。曾在挪威科学技术大学、挪威大陆架石油研究中心和美国Oklahoma大学做研究工作数年。现在美国Oklahoma大学从事声波测井和AVO研究。(地址:陕西省西安市西安石油勘探仪器总厂 邮编:710061)
- 侯连华** 讲师,博士,1970年生。(地址:北京市昌平区水库路石油大学资源与信息学院信息系 邮编:102249)
- 刘忠松** 工程师,1968年生。1993年毕业于江汉石油学院物探系。现从事仪器维修和开发工作。(地址:山东省东营河口胜利测井一分公司 邮编:257200 电话:0546 8672872 E-mail:hk_lzs@163.com)
- 胡学红** 工程师,1967年生。1990年毕业于江汉石油学院电子系。现从事声波测井研究工作。(地址:湖北省潜江市江汉测井研究所 邮编:433123 电话:0728 6558321)
- 耿斌** 工程师,1972年生。1994年毕业于石油大学(山东)测井专业。1999年毕业于石油大学(山东)地质专业,获硕士学位。现在胜利油田地质科学研究院从事测井解释和储量研究工作。(地址:山东省东营市胜利油田地科院 邮编:257000)
- 汤军** 在读博士生。现就读于中国地质大学(北京)。(地址:北京海淀区学院路29号中国地质大学99博 邮编:100083 电话:010-82323583 E-mail:tang026@sina.com)
- 张芳** 工程师,1969年生。1992年毕业于大庆石油学院测井专业。现从事测井解释工作。(地址:吉林省松原市吉林油田测井公司综合研究室 邮编:138003 电话:0438 6390738/6336046)
- 姬铜芝** 工程师,1965年生。1989年毕业于江汉石油学院矿场地球物理专业。现从事5700系统测井工作。(地址:河南南阳河南油田测井公司 邮编:473132 电话:0377 3839461)
- 杨超华** 工程师,1970年生。1992年毕业于石油大学勘探系测井专业。现从事测井解释工作。(地址:河南省郑州市伏牛路197号 邮编:450006 电话:0371 8611590 244)
- 刘金光** 工程师,1964年生。1988年毕业于成都理工大学石油物探专业。现在中石化新星公司西南石油局测井公司从事管理工作。(地址:四川省成都市龙泉驿区星光东路测井公司 邮编:610100 电话:028 84872363)
- 王振信** 高级工程师,1942年生。1962年毕业于郑州地质学校放射性专业。从事放射性工作近40年。1998年退休后继续从事该项研究。(地址:河南南阳河南油田测井公司 邮编:473132 电话:0377 3858669 13909954178)
- 丛健生** 实验师,1970年生。1990年毕业于大庆石油学院。现在大庆石油学院从事声波测井的研究工作。(地址:黑龙江省安达市大庆石油学院勘探系 邮编:151400 电话:0459 4653473)
- 王春利** 高级工程师,1962年生。1984年毕业于大庆石油学院石油地质专业。现任吐哈石油勘探开发指挥部录井测井公司总经理。(地址:新疆鄯善吐哈石油勘探开发指挥部录井测井公司 邮编:838202 电话:0995 8372385)
- 刘森** 工程师,1970年生。1993年毕业于大庆石油学院矿场地球物理专业。现从事测井监督工作。(地址:河南省濮阳市中原油田分公司工程监督中心 邮编:457001 电话:0393 4733014)
- 李敬功** 高级工程师,1965年生。1986年毕业于江汉石油学院测井专业。现从事测井方法研究。(地址:河南省濮阳中原油田分公司勘探开发研究院测井研究室 邮编:457001 电话:0393 4816478)
- 艾时钟** 工程师,1967年生。1989年毕业于江汉石油学院测井专业。现从事成像测井系统研制工作。(地址:西安市西影路53号石油勘探仪器总厂研究所 邮编:710054 电话:029 6584016)
- 李会银** 副教授,1965年生。1991年毕业于石油大学应用地球物理专业,获硕士学位。现在石油大学(山东)攻读博士学位。研究方向为地球探测与信息技术。(地址:山东省东营市石油大学资源与信息学院 邮编:257061 电话:0546 8392268 8209 13001560656 E-mail:lihuiyin@mail.hqpu.edu.cn)
- 丁柱** 1967年生。1989年毕业于西北大学理论物理专业,1995年获哈尔滨工业大学应用数学硕士学位,现在中国科学院地质与地球物理研究所攻读博士学位。主要从事电阻率测井和电磁波测井方法研究与信号处理工作。(地址:黑龙江省大庆市大庆测井公司研究所 邮编:163412 电话:0459 5681886 E-mail:dingzhu@cj.dq.cnpc.com.cn)
- 林中雨** 大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司 电话:0459 5835478(办) 5832957(家) zyulin@mail.dqt.com.cn
- 左三林** 高级工程师,1966年生。1989年毕业于江汉石油学院电子仪器及测量技术专业。一直从事石油仪器的研制开发工作。(地址:陕西省西安市红专南路10号西安石油勘探仪器总厂 邮编:710061 电话:029 6583259)