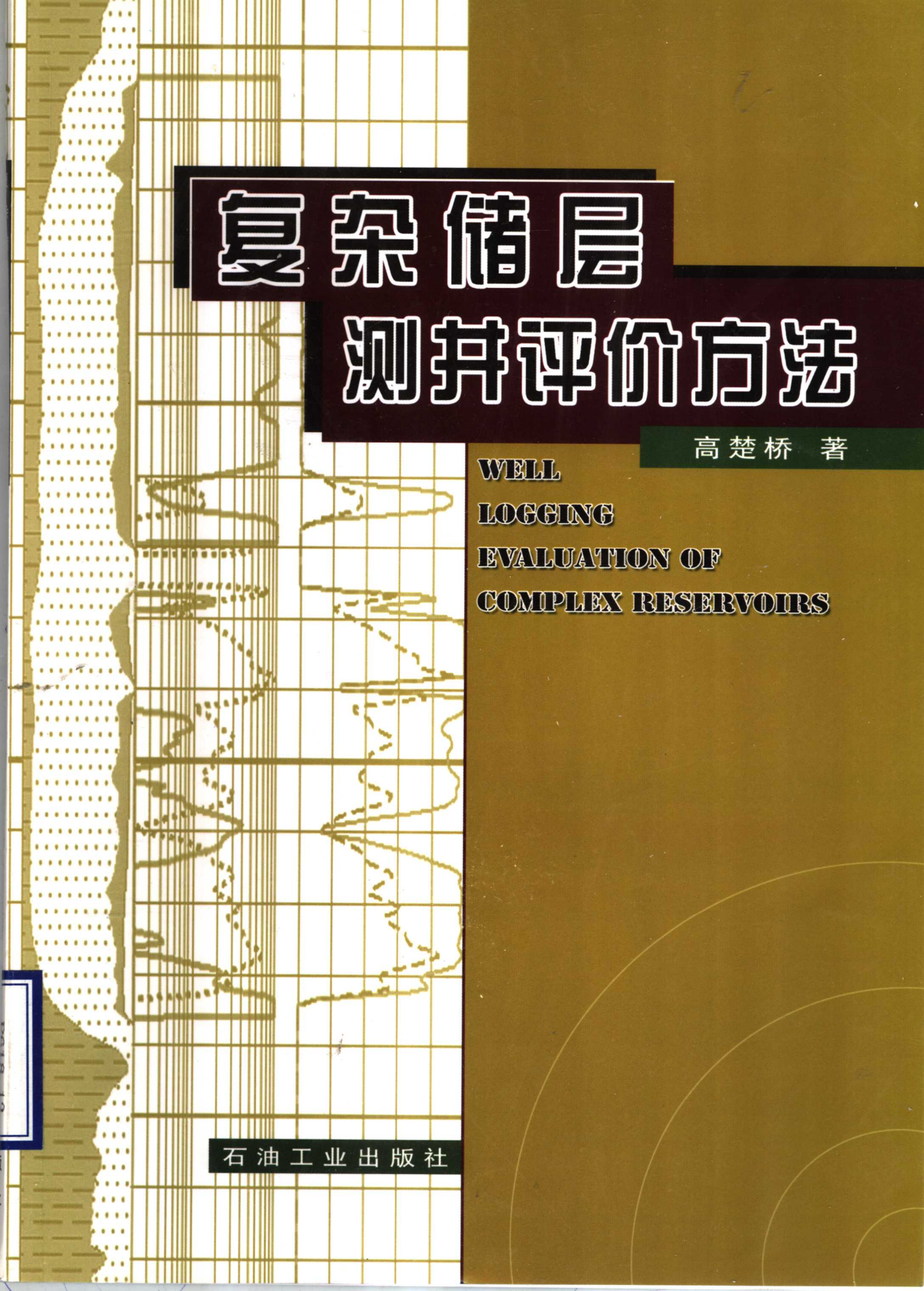




复杂储层

测井评价方法

高楚桥 著

WELL
LOGGING
EVALUATION OF
COMPLEX RESERVOIRS

石油工业出版社

复杂储层测井评价方法

高楚桥 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书论述了基于最优化理论的复杂岩性储层测井评价程序的地层组分分析程序的原理与算法；讨论了导电效率理论，以实验结果为基础，得到了基于导电效率理论的含水饱和度模型，以理论推导为依据，提出了用岩石导电效率划分碳酸盐岩储层类型的原理与方法；以实际油田为研究对象，全面系统地讨论了几种复杂储层的测井评价方法，包括低电阻率气层的测井识别与评价方法、低电阻率油层的测井识别与评价方法以及水淹层测井评价方法。

本书可作为高等院校测井专业研究生教材，也可供测井、地质、开发专业高年级本科生及从事测井分析的生产与科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂储层测井评价方法/高楚桥等著.

北京: 石油工业出版社, 2003.9

ISBN 7-5021-4385-8

I. 复…

II. 高…

III. 储集层-测井

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 082340 号

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北天普润印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 260 千字 印 1001—2000

2003 年 9 月北京第 1 版 2004 年 10 月河北第 2 次印刷

ISBN 7-5021-4385-8/TE·3069

定价: 25.00 元

前 言

在我国各含油气盆地已发现了多种不同类型的复杂储层,包括复杂岩性储层、复杂储集空间储层、复杂孔隙流体类型储层,如碳酸盐岩储层、低电阻率油气层、凝析油气层、水淹层等。利用测井资料对这些储层进行评价一直是测井解释的难题。本书总结了作者近年来在复杂储层测井评价方面的研究成果,供读者参考。

全书共分六章。第一章阐述了用于复杂岩性储层测井评价的地层组分分析程序的原理与算法,以及地层组分分析原理在凝析油气层测井评价中的应用。第二章讨论了导电效率理论及其在含水饱和度评价方面的应用。第三章给出了地层组分分析程序和导电效率理论在碳酸盐岩储集空间类型识别与评价中的应用。前三章是作者博士论文成果,是在导师[谭廷栋]教授、李宁教授、钟兴水教授的悉心指导下完成的。第四章以 D 油田为研究对象,全面系统地讨论了低电阻率气层的测井评价方法,包括低电阻率气层的形成机理、低电阻率气层的测井识别、高温高压岩石物性与电性影响实验研究、束缚水饱和度测井评价方法、核磁共振 T_2 截止值实验研究。本研究的完成得到了南海西部石油公司研究院各位领导及吴洪深责任工程师、李茂文、林德明项目长的支持与帮助。第五章以我国西部 H 油田为研究对象,讨论了低电导率油层的测井识别与评价方法。第六章以我国西部 L 油田为例,讨论了水淹层的测井识别与评价方法。第五、六章研究内容的完成,得到了塔里木油田分公司研究院领导及肖承文高级工程师、赵军博士、陈新林高级工程师、宋帆工程师等同志的帮助和支持。另外,以上工作的完成与成果的取得也得到了关睢总工程师、郭海敏教授、张超谟教授、章成广教授、刘瑞林教授的帮助。作者对所有给予指导和帮助的老师、领导和测井同仁表示最诚挚的感谢!

由于作者水平有限,书中存在的问题与不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 地层组分分析程序	(1)
第一节 物理模型	(1)
第二节 数学模型	(2)
第三节 求解算法	(4)
第四节 响应方程与约束条件	(8)
第五节 常见测井响应参数的理论计算	(9)
第六节 利用地层组分分析程序评价凝析油气层	(17)
第七节 结论	(22)
第二章 岩石导电效率及其与含水饱和度之间的关系	(23)
第一节 岩石的导电效率及其非均匀分布特征	(23)
第二节 导电效率与孔隙度及含水孔隙度的关系	(24)
第三节 用导电效率理论求含水饱和度	(27)
第四节 油气进入不同大小的孔隙时岩石电阻率与含水饱和度的关系	(28)
第五节 结论	(31)
第三章 地层组分分析程序和导电效率理论在碳酸盐岩测井评价中的应用	(32)
第一节 用岩石导电效率识别碳酸盐岩储层类型	(32)
第二节 双孔隙度模型及裂缝孔隙度和基块孔隙度的计算	(35)
第三节 资料处理分析及储层类型和等级的划分	(37)
第四节 结论	(46)
第四章 Y盆地低电阻率气层测井识别与评价	(48)
第一节 低电阻率气层形成机理研究	(48)
第二节 低电阻率气层测井识别方法	(60)
第三节 高温高压条件下岩石物性与电性实验研究	(64)
第四节 束缚水饱和度测井评价方法研究	(70)
第五节 核磁共振 T_2 截止值实验研究	(85)
第五章 H4油田低电阻油层测井评价方法研究	(94)
第一节 H4油田低电阻率油层特征	(94)
第二节 H4油田低阻油层形成机理分析	(96)
第三节 H4油田测井储层参数研究	(102)
第四节 用油水相对渗透率确定低阻油藏产液性质	(110)
第五节 低电阻率油层测井解释方法在东濮凹陷的应用	(113)
第六节 结论	(117)
第六章 L油田水淹层测井评价	(118)
第一节 水淹层及其特征概述	(118)
第二节 L油田水淹油层测井响应规律及水淹层测井识别	(122)

第三节	L 油田裸眼井剩余油饱和度的确定	(125)
第四节	用中子寿命测井确定套管井剩余油饱和度	(128)
第五节	用测井资料计算含水率方法研究	(134)
第六节	水淹等级的划分	(140)
第七节	水淹层测井解释软件系统	(142)
第八节	L 油田水淹层测井处理与分析	(144)
第九节	结论	(157)
参考文献		(159)

第一章 地层组分分析程序

测井得到的是岩石表现出来的物理性质（如电学性质、声学性质、核物理学性质等），而不是直接测得的岩石物性（如孔、渗、饱）。因此，由测井值反演地层参数是测井解释学中的基本任务，这也是最优化测井解释程序与地层组分分析程序的用途。

20 世纪 80 年代出现的最优化测井解释程序，如斯仑贝谢测井公司的 GLOBAL，江汉石油学院的 DMO，都是一种以最优化原理为基础的复杂岩性分析程序，它们通过求解以下目标函数的最优解，求取符合地质情况的最大几率解。

$$\Delta = \sum_{i=1}^m \frac{[\alpha_i - f_i(\vec{x})]^2}{\sigma_i^2 + \tau_i^2} + \sum_{j=1}^p \frac{[G_j(\vec{x})]^2}{T_j^2}$$

式中 m ——响应方程个数；

p ——约束个数；

α_i ——实际测井值；

$f_i(\vec{x})$ ——理论测井值；

σ_i ——测井值误差；

τ_i ——响应值误差；

T_j ——约束误差；

$G_j(\vec{x})$ ——不符合约束程度值；

$\vec{x}$ ——数组，最优化求解的未知数， $\vec{x} = (\text{孔隙度}, \text{含水饱和度}, \text{泥质含量}, \text{矿物骨架 1 含量}, \text{矿物骨架 2 含量} \cdots)$ 。

该目标函数非常复杂，局部极值点多，寻优计算量大，并且所求极值点不一定是目标函数的全局极小点，这使得最优化测井解释程序在实际应用中受到一定限制。为克服最优化测井解释程序的这些不足，发展了地层组分分析程序。

本章将分别给出地层组分分析程序反演地层参数的物理模型、数学模型、反演算法、响应方程以及测井解释参数的获得方法。

第一节 物理模型

对含油气的储层来说，储层可以看成是由具有不同性质的组分组成的，这些组分包括不动油、可动油、可动水、天然气、泥质以及岩石的各种骨架矿物。测井分析的主要任务就是求准这些组分在地层中的相对含量，人们习惯使用的“含油（气）饱和度”和“孔隙度”等参数都可以由以上的组分含量所导出。组成地层的组分可能有很多种，因此要用现有的有限测井信息正确反演出组成地层的全部组分是不可能的。一般情况下，组分的个数必须小于或等于响应方程的个数加 1，为满足这一要求，通常采用下列方法。

(1) 把地层中物理性质相近的组分看成是同种组分, 例如: 可把绿泥石、伊利石和其它粘土矿物称为泥质。

(2) 把地层中一些含量很小的组分合并到性质与之相近的组分之中。例如, 砂岩中含有少量长石时, 可将长石合并到石英中去, 认为该砂岩就是纯石英砂岩。

对岩性不十分复杂的储层来说, 允许运用以上的简化处理方法。简化后的物理模型见图 1-1。

有效孔隙度	x_{or}	不动油相对体积
	x_{om}	可动油相对体积
	x_{fw}	自由水相对体积
	x_{gas}	天然气相对体积
泥质含量	x_{sh}	泥质相对体积
骨架矿物含量	x_{ma1}	k 种矿物骨架相对体积 ($k = 1, 2, 3, \dots, n$)
	x_{ma2}	
	$\dots$	
	x_{mak}	

图 1-1 地层组分分析程序物理模型示意图

根据这一地层模型, 可得到以下地层参数的表达式

孔隙度

$$\phi = x_{or} + x_{om} + x_{fw} + x_{gas}$$

地层含水饱和度

$$S_w = \frac{x_{fw}}{x_{or} + x_{om} + x_{fw} + x_{gas}} \quad (1-1)$$

冲洗带含水饱和度

$$S_{xo} = \frac{x_{om} + x_{fw} + x_{gas}}{x_{or} + x_{om} + x_{fw} + x_{gas}} \quad (1-2)$$

泥质含量

$$V_{sh} = x_{sh}$$

式中 x_{or} ——不动油相对体积;

x_{om} ——可动油相对体积;

x_{fw} ——自由水相对体积;

x_{gas} ——天然气相对体积;

x_{sh} ——泥质相对体积。

这样建立的物理模型, 使得数学模型相对简单, 易于求解。

第二节 数学模型

一、待解决的反演问题

根据地层组分分析模型, 可写出各种测井仪器的响应方程式。例如, 密度测井的响应方程为

$$\rho_b = \rho_{or}x_{or} + \rho_{om}x_{om} + \rho_{fw}x_{fw} + \rho_{gas}x_{gas} + \rho_{sh}x_{sh} + \rho_{ma1}x_{ma1} + \rho_{ma2}x_{ma2} + \Lambda + \rho_{mak}x_{mak}$$

式中, ρ_{or} , ρ_{om} , ρ_{fw} , ρ_{gas} , ρ_{sh} , ρ_{ma1} , ρ_{ma2} , Λ , ρ_{mak} 分别表示地层中不动油、可动油、自由水、气、泥质、岩石骨架矿物 (1~k 种) 的体积密度值。为简便起见, 将上式写成

$$\sum_{j=1}^n \rho_j x_j = \rho_b \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

其中, n 表示组成地层的组分个数, x_j 表示第 j 种组分的相对含量。同理可写出其它测井仪器的响应方程, 用通式表示为

$$\sum_{j=1}^n A_{ij}x_j = B_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1-3)$$

式中 m ——测井仪器的个数;

B ——地层对测井仪器的响应值。

解以上由 m 个方程组成的方程组, 就可以求得 x_j , 这就是待解决的反演问题。

二、建立带约束的超定线性方程组

当 $m < n$ 时, 方程组有多个解, 无实际意义; 当 $m = n$ 时, 以上方程组有唯一解, 但是, 为了充分利用测井信息, 提高测井解释的可靠性, 一般情况下, $m > n$, 此时方程组为超定线性方程组, 它具有一最优解。这一最优解 $\hat{x}^*$ 有可能出现 $x_j^* < 0$ 或 $x_j^* > 1$ 的现象, 这种结果在地质上是不存在的或无意义的。为了使求解的结果合乎地质意义并符合地层实际情况, 需要在式 (1-3) 中加入有关的约束条件, 即

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n A_{ij}x_j = B_i & (i=1, 2, \dots, m) \\ \text{约束 } R: \sum_{j=1}^n x_j = 1 \\ 0 \leq x_j \leq 1 & (j=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

写成更一般的形式

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n A_{ij}x_j = B_i & (i=1, 2, \dots, m) \\ \text{约束 } R: \sum_{j=1}^n x_j = c \\ 0 \leq x_j \leq x_{\max j} & (j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (1-4)$$

其中, c 、 $x_{\max j}$ 均为常数, 在地层组分分析程序中 $c=1$, $x_{\max j}$ 为第 j 种组分的最大相对体积。

式 (1-4) 为一带约束的超定线性方程组。

三、目标函数

由线性最小二乘原理, 解式 (1-4) 这一带约束线性方程组的问题可转换成以下求极值

问题

$$\begin{cases} \min f(\vec{x}), f(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n A_{ij}x_j - B_i)^2 \\ \text{约束 } R: \sum_{j=1}^n x_j = c \\ 0 \leq x_j \leq x_{\max j} \quad (i=1, 2, \dots, n, m; j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (1-5)$$

由于不同的测井值的量纲不一样，而且它们的测量值大小的差别也很大，因此在实际计算中需要将式 (1-5) 的目标函数的系数 A 及 B 进行标准化处理，以便使各种仪器的 A 和 B 值都成为无量纲的数，并在同一数量级上，这样可使得各种测井方法对最终结果具有相同的贡献。标准化处理的方法是将方程的两边同时除以一个系数 P ，该系数除具有标准化作用外，还具有权系数的作用，质量差的测井曲线应赋予低的权系数，质量好的测井曲线应赋予高的权系数。

当 $n \leq m$ 时，线性方程组 (1-3) 的最小二乘解是唯一的（因为在实际问题中矩阵 A 满秩），并且式 (1-4) 的解空间为凸空间，因此这种带约束的线性方程组 (1-4) 的解是唯一的，极小化问题式 (1-5) 只有一个极小点。式 (1-5) 构成了地层组分分析方法的数学模型， $f(\vec{x})$ 为目标函数。

第三节 求解算法

一、算法

现假定方程 (1-4) 已进行标准化处理，下面讨论极小化问题式 (1-5) 的求解方法。

任取 R 中的一个点 $\vec{x}^{(0)}$ ，在 $\vec{x}^{(0)}$ 处 $f(\vec{x})$ 的线性逼近函数为

$$f_L(\vec{x}) = f(\vec{x}^{(0)}) + [\nabla f(\vec{x}^{(0)})] (\vec{x} - \vec{x}^{(0)}) \quad (1-6)$$

其中： $\nabla f(\vec{x}^{(0)}) = [\frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_n}]$

显然，求线性规划问题 $\min f_L(\vec{x})$ 的最优解，等价于求线性规划问题 $\min [\nabla f(\vec{x}^{(0)})]^T \vec{x}$ 的最优解。令 $\vec{x}_{FL}^{(0)}$ 为式 (1-5) 的最优解， $\frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_k} = \min [\frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_n}]$ ，由线性规划的性质可知， $\vec{x}_{FL}^{(0)}$ 必为 R 的一个顶点，因此可得

$$x_{FLj}^{(0)} = \begin{cases} 0 & (j \neq k) \\ x_{\max j} & (j = k) \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

下面分两种情况讨论：

(1) 当 $[\nabla f(\vec{x}^{(0)})]^T (\vec{x}_{FL}^{(0)} - \vec{x}^{(0)}) = 0$ 时， $\vec{x}_{FL}^{(0)}$ 就是线性规划问题的解，迭代停止。

(2) 当 $[\nabla f(\bar{x}^{(0)})]^T (\bar{x}_{FL}^{(0)} - \bar{x}^{(0)}) \neq 0$ 时, 则问题变为极值问题:

$$\min_{\lambda \in [0,1]} f[\bar{x}^{(0)} + \lambda (\bar{x}_{FL}^{(0)} - \bar{x}^{(0)})]$$

的最优解 λ_0 , 这时必有 $0 \leq \lambda_0 \leq 1$ 。

令: $\bar{x}^{(1)} = \bar{x}^{(0)} + \lambda_0 (\bar{x}_{FL}^{(0)} - \bar{x}^{(0)})$, 把 $\bar{x}^{(1)}$ 作为 $\bar{x}^{(0)}$ 继续用上述方法线性逼近目标函数 $f(\bar{x})$, 并重复以上步骤, 直到满足精度为止, 就可求得带约束线性超定方程组 (1-4) 的解。图 1-2 为地层组分分析程序中求解数学模型式 (1-5) 的计算机流程图。

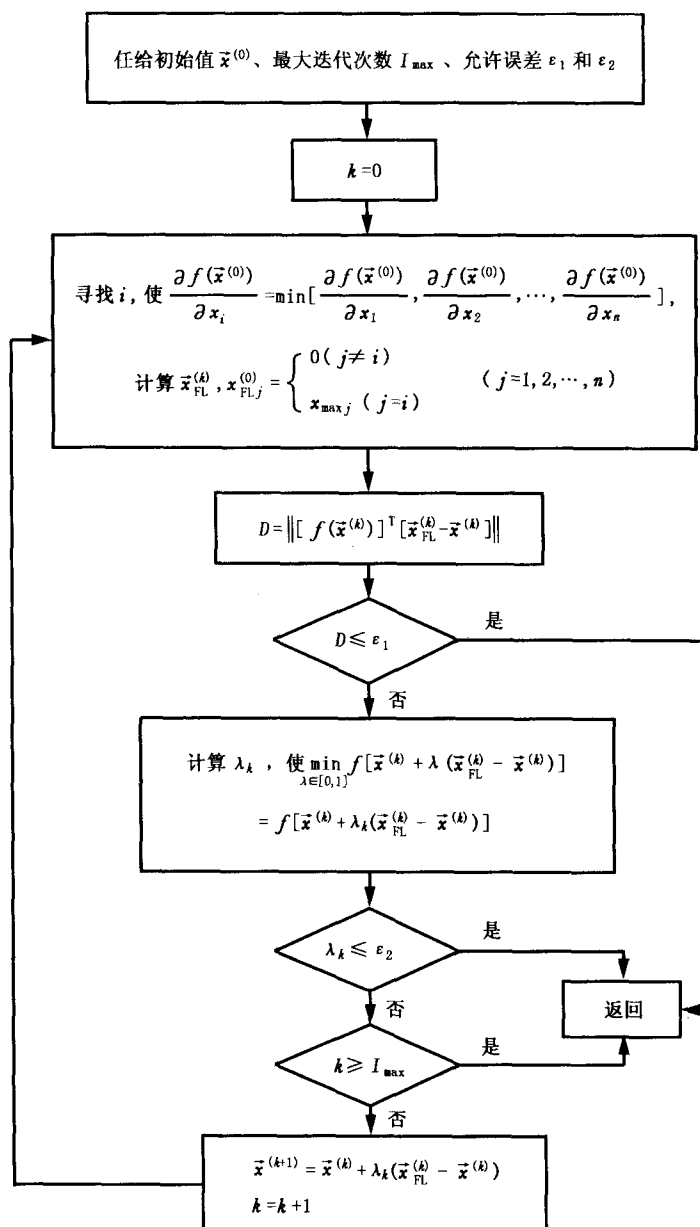


图 1-2 地层组分分析程序中求解数学模型的计算机流程图

在极小值问题 (1-5) 中, 很容易写出 $f(x^0)$ 的一阶导数, 因此, 寻优计算工作量小, 并且目标函数 $f(x^0)$ 不存在多个局部极小点, 所以对迭代初始值的要求不严, 不管迭代初始值怎样选择, 在有限步内, 总可收敛到同一极小点。

二、算法的其它应用: 由地球化学测井资料求岩石矿物含量

由地球化学测井 (GLT) 提供的岩石的化学成分 (氧化物含量) 反演矿物含量是岩石学家必须解决的问题。

假定岩石中有 n 种矿物, 每种矿物包含 m 种氧化物成分。则

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = y_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

式中 a_{ij} ——矿物 j 中第 i 种氧化物的重量百分比;

x_j ——岩石中第 j 种矿物的重量百分比;

y_i ——岩石中第 i 种氧化物的重量百分比。

在地球化学测井中, y_i 为已知, a_{ij} 可在实验室测得。对矿物含量, 有地质约束:

$$0 \leq x_j \leq 1$$

且
$$\sum_{j=1}^n x_j = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

因此, 求矿物含量 x_i 的问题, 可转化为解如下约束方程组问题

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{1j}x_j = y_1 \\ \sum_{j=1}^n a_{2j}x_j = y_2 \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n a_{mj}x_j = y_m \\ \text{约束: } 0 \leq x_j \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n x_j = 1 \end{array} \right. \quad (1-7)$$

该约束方程组完全可由上文所给算法求解。

作者直接应用 Harvey 等人发表的数据 (1992) 进行了实际计算, 并将其结果与其它三种方法的结果作了对比。表 1-1 为矿物的氧化物含量, 表 1-2 为人造岩石的 X 射线荧光分析结果。表 1-3 是三种方法计算结果的比较, 其中: TA 表示人造岩石的实际矿物成分, GA 表示 Fang 等人给出的遗传算法结果 (1996), LS 表示 Harvey 等人 (1992 年) 的最小二乘法结果, CQ 表示本文算法的结果。

从表 1-3 可看出 CQ 方法计算结果的误差, 除砂屑岩和泥质岩比 LS 法大外, 其它都比另外两种方法小。因此该方法能够应用于由地球化学资料反演矿物含量, 其精度高于遗传算法, 与最小二乘法相当。

表 1-1 矿物的化学成分 (单位:%) (据 Harvey, 1992 年)

矿物	石英	钠长石	高岭石	钾长石	白云母	方解石	白云石
SiO ₂	99.07	65.81	47.63	64.33	45.78	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.23	21.33	37.95	19.04	34.21	0.00	0.00
TiO ₂	0.01	0.02	0.06	0.01	0.24	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.15	0.11	0.65	0.11	3.04	0.00	0.00
MgO	0.13	0.05	0.01	0.01	0.69	0.04	21.12
CaO	0.00	1.86	0.03	0.04	0.00	55.92	31.27
Na ₂ O	0.21	9.82	0.72	2.49	1.01	0.00	0.00
K ₂ O	0.02	0.67	0.86	13.16	10.24	0.00	0.00
MnO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.12	0.00	0.22
P ₂ O ₅	0.01	0.03	0.11	0.48	0.22	0.00	0.00
S	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	43.95	47.22
总和	99.84	99.78	88.03	99.68	95.55	99.91	99.97

表 1-2 人造岩石混合物的 X 射线荧光分析 (单位:%) (据 Harvey, 1992 年)

岩石	硬砂岩	砂屑岩	泥板岩	泥质岩
SiO ₂	83.54	87.22	62.84	57.40
Al ₂ O ₃	9.83	4.30	25.41	23.85
TiO ₂	0.02	0.12	0.10	0.13
Fe ₂ O ₃	0.14	0.50	0.99	1.62
MgO	0.06	0.51	0.18	1.30
CaO	0.41	1.45	0.07	1.58
Na ₂ O	2.28	0.92	0.04	0.80
K ₂ O	1.57	1.90	2.90	6.81
MnO	0.00	0.01	0.02	0.07
P ₂ O ₅	0.71	0.03	0.06	0.10
S	0.00	0.00	0.00	0.00
总和	98.56	96.96	92.61	93.66

表 1-3 三种算法计算结果的对比 (单位:%)

岩石	石英	钠长石	高岭石	钾长石	白云母	方解石	白云石	总和	平均绝对误差
硬砂岩	TA	60	20	10	10			100	—
	GA	60.2	19.9	9.7	9.5			99.3	0.36
	LS	59.9	19.2	9.7	11.1			99.9	0.48
	CQ	59.9	19.5	10	10.6			100	0.25

续表

岩石		石英	钠长石	高岭石	钾长石	白云母	方解石	白云石	总和	平均绝对误差
砂屑岩	TA	80			10	5	2.5	2.5	100	—
	GA	79.9			10.3	4.6	0.1	0.2	95.1	1.73
	LS	78.3			10.4	6.8	2.1	2.1	99.7	0.83
	CQ	77.6			11.1	8.3	2.5	0.5	100	1.48
泥板岩	TA	30		45		25			100	—
	GA	29.6		45.7		23.6			98.9	0.9
	LS	30.6		45		24.4			100	0.3
	CQ	30.6		44.9		24.5			100	0.3
泥质岩	TA	20		15	15	45		5	100	—
	GA	19.8		15.3	15.5	44.4		0.1	95.1	1.9
	LS	20.5		13.4	14.4	46.9		4.7	99.9	0.83
	CQ	19		16.6	17.5	43.6		3.3	100	1.37

第四节 响应方程与约束条件

一、响应方程

1. 线性形式

密度、中子、纵波时差、铀、钍、钾、压缩系数等测井响应方程可写成如下线性形式

$$\sum_{j=1}^n x_j A_j = B$$

式中 x_j ——第 j 种组分的相对含量。这些组分是：不动油、可动油、自由水、气、泥质以及各种岩石骨架矿物；

A_j ——第 j 种组分对相应测井曲线的响应值；

B ——测井值。

用于指示泥质含量的测井方法，其响应方程可写成

$$(B_{\text{shale}} - B_{\text{clean}}) x_{\text{sh}} = B - B_{\text{clean}}$$

式中 B_{shale} ——纯泥岩对相应测井方法的响应值（如泥岩自然伽马值、泥岩自然电位值）；

B_{clean} ——纯地层对相应测井方法的响应值（如纯地层自然伽马值、纯地层自然电位值）；

x_{sh} ——泥质含量。

2. 非线性形式

非线性响应方程主要是各种形式的电阻率响应方程，具体形式本文不再列出，将它们写成如下通式：

$$\text{深电阻率方程: } S_w = f_w(R_t, a, b, m, n, R_w, \phi, V_{sh}, R_{sh}) \quad (1-8)$$

$$\text{浅电阻率方程: } S_{xo} = f_{xo}(R_{xo}, a, b, m, n, R_{mf}, \phi, V_{sh}, R_{sh}) \quad (1-9)$$

地层组分分析程序不能直接使用这些非线性方程, 因而采用了如下处理方法: 用上一采样点计算出的孔隙度 ϕ 和泥质含量 V_{sh} 代入式 (1-8)、(1-9), 求出当前采样点的 S_w 和 S_{xo} , 由式 (1-1)、(1-2) 有

$$\begin{aligned} S_w x_{or} + S_w x_{om} + (S_w - 1) x_{fw} + S_w x_{gas} &= 0 \\ S_{xo} x_{or} + (S_{xo} - 1) x_{om} + (S_{xo} - 1) x_{fw} + S_{xo} - 1) x_{gas} &= 0 \end{aligned} \quad (1-10)$$

这种线性形式的方程是地层组分分析程序反演算法可直接使用的。

二、约束条件

所有组分的相对含量之和应为 100%, 即 $\sum_{j=1}^n x_j = 1$; 并满足

$$0 \leq x_j \leq x_{\max j}$$

式中 $x_{\max j}$ ——第 j 种组分相对含量的最大值。

第五节 常见测井响应参数的理论计算

在实际测井解释及资料处理过程中, 选择响应参数具有一定盲目性和随意性, 无坚实的理论根据。用岩心刻度测井的方法求得的响应参数值, 在某一口井或某一特定地区有其实用性, 但对整个油田或其它地区不能使用。这些响应值必须重新进行刻度, 这样做的成本是巨大的, 也是不可能的。以下系统地给出了生产实际中常见矿物和流体响应值的理论计算方法, 旨在对实际使用有一定指导作用。

一、电阻率响应参数

电阻率是指示含油性确定含油饱和度的最直接参数。一般认为常见岩石(砂岩、石灰岩、白云岩)的骨架、油气和纯水是不导电的。这里只讨论一定矿化度的盐水的导电性。

设盐水的电阻率为 R , 横截面为 A , 长为 L 的导电体的电阻为 r , 由欧姆定律得

$$r = R \frac{L}{A} \quad (1-11)$$

考虑 r 与 R 的关系, 把 L 、 A 看成常数, 两边微分得

$$dr = \frac{L}{A} dR \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 两边同时除以 r , 并将式 (1-11) 代入得

$$\frac{dr}{r} = \frac{dR}{R} \quad (1-13)$$

盐水的导电性受温度 T 的影响, 将式 (1-13) 两边同除以 dT 得

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{dT} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1-14)$$

由于盐水是离子导电，温度升高，电阻率降低，故可令式 (1-14) 为

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{dT} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\alpha$$

其中 α 为正数。于是有

$$\frac{1}{R} dR = -\alpha dT \quad (1-15)$$

设温度为 T_0 时相应电阻率为 $R_w(T_0)$ ，温度为 T_1 时，相应的电阻率为 $R_w(T_1)$ ，对式 (1-15) 两边作定积分，即

$$\int_{R_w(T_0)}^{R_w(T_1)} \frac{1}{R} dR = -\alpha \int_{T_0}^{T_1} dT$$

由此可推得

$$\frac{R_w(T_1)}{R_w(T_0)} = \frac{1}{e^{\alpha(T_1 - T_0)}}$$

将上式右边分式的分母展开为级数，只取前两项得

$$R_w(T_1) = R_w(T_0) \frac{1}{1 + \alpha(T_1 - T_0)} \quad (1-16)$$

写成电导率形式，即

$$C_w(T_1) = C_w(T_0) [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (1-17)$$

实验表明：当温度为 -21.5°C 时，盐水无导电性。将 $T_1 = -21.5^\circ\text{C}$ ， $C_w(T_1) = 0$ 代入式 (1-17) 得

$$\alpha = \frac{1}{21.5 + T_0}$$

将 α 代入式 (1-16) 得

$$R_w(T_1) = R_w(T_0) \frac{21.5 + T_0}{21.5 + T_1} \quad (1-18)$$

其中： T_0 、 T_1 的单位为 $^\circ\text{C}$ ； $R_w(T_0)$ 、 $R_w(T_1)$ 的单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

上式表明，若已知温度为 T_0 时的电阻率，就可计算出温度为 T_1 时的电阻率。

二、密度测井响应参数

密度测井测量的是地层的电子密度 ρ_e ，用含水石灰岩刻度表示的刻度方程为

$$\rho_a = 1.07 (\rho_e)_i - 0.1883 \quad (1-19)$$

其中 $(\rho_e)_i$ 为电子密度指数，定义为

$$(\rho_e)_i = \frac{2\rho_e}{N} \quad (1-20)$$

式中 N 为阿伏加德罗常数。

经过刻度方程式 (1-19) 刻度后, 仪器记录的是地层的视体积密度 ρ_a 。

从式 (1-19) 和式 (1-20) 可看出 ρ_a 与 ρ_e 是线性关系, 因此在实际工作中, 可以直接用体积密度写响应方程, 而不是用电子密度。

由于仪器记录的是式 (1-19) 刻度后的视体积密度, 因此, 密度响应方程中的响应参数也应该是式 (1-19) 刻度后的视体积密度。下面讨论视体积密度的理论计算。

1. 骨架、纯水、油的视体积密度

地层体积密度与电子密度的关系是

$$\rho_e = \rho_b \left(\frac{Z}{A} \right) N \quad (1-21)$$

式中 Z ——原子序数;

A ——原子量;

N ——阿伏加德罗常数。

将式 (1-21) 代入式 (1-20) 得

$$(\rho_e)_i = \rho_b \left(\frac{2Z}{A} \right) \quad (1-22)$$

将式 (1-22) 代入式 (1-19) 得刻度后的视体积密度

$$\rho_a = 1.07 \rho_b \left(\frac{2Z}{A} \right) - 0.1883 \quad (1-23)$$

对由多个原子组成的化合物, 式 (1-23) 应为

$$\rho_a = 1.07 \rho_b \left[\frac{2 \sum Z}{M} \right] - 0.1883 \quad (1-24)$$

其中: $\sum Z$ 为总原子序数; M 为分子量。如: 已知 H、O、Si、C 的原子序数及原子量分别为: 1.008^1H 、 16^8O 、 28.086^{14}Si 、 12.011^6C , 纯水 (H_2O)、石英 (SiO_2)、油 [$n(\text{CH}_2)$] 的实际密度为 1.0g/cm^3 、 2.654g/cm^3 、 0.85g/cm^3 , 则可用式 (1-24) 计算出纯水、石英、油的视体积密度分别为: 1.0g/cm^3 、 2.647g/cm^3 、 0.850g/cm^3 。

2. 已知浓度的盐水的视体积密度

设盐水为 NaCl 溶液 (以下同), 浓度为 p ; 溶液总重量为 m , 水的重量为 $m_{\text{H}_2\text{O}}$, NaCl 的重量为 m_{NaCl} ; 溶液、水、NaCl 的密度和体积分别为 ρ_w 、 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 ρ_{NaCl} 和 V_w 、 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 V_{NaCl} 。

$$\text{由于} \quad m = m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NaCl}}$$

$$\text{即} \quad V_w \rho_w = V_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{NaCl}} \rho_{\text{NaCl}}$$

$$\therefore \quad \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1$$

$$\therefore \quad \rho_w = 1 + \left(1 - \frac{1}{\rho_{\text{NaCl}}} \right) \frac{m_{\text{NaCl}}}{V_w}$$