

文章编号: 1000-7598 (2009) 06-1850-06

构造应力场边界载荷反演的有限元逆逼近法

付玉华^{1,2}, 王兴明², 袁海平²

(1.中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2.江西理工大学 应用科学学院, 赣州 341000)

摘 要: 构造应力场问题的边界条件、加载方式是地应力场分析的难题, 由于构造运动未知和地质构造复杂, 无法直接求解。边界力反演是进行构造应力场研究的重要手段。从弹性力学基本方程出发, 针对油气储层地应力场反问题, 结合对区域构造应力场认识, 利用阻尼最小二乘法建立了应力场反演的约束模型, 提出了一种用于反演构造应力场边界力的反分析方法, 该方法根据部分实测点的应力值进行边界力反演, 并与有限元方法和有限差分法相结合, 以边界力为参量逼近目标函数。根据研究区少量地应力实测资料采用该方法进行最优化计算, 使得计算应力场与实测应力达到最优拟合, 以弥补目前的回归反演方法和边界载荷调整法的不足来提高计算精度。算例表明了该方法的有效性, 可用于解决构造应力场边界力的反演问题。

关 键 词: 构造应力场; 有限元; 最小二乘法; 有限元逆逼近

中图分类号: TE 131.1; P 553

文献标识码: A

Finite element inverse analysis of boundary load for tectonic stress field

FU Yu-hua^{1,2}, WANG Xing-ming², YUAN Hai-ping²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Application and Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Tectonic stress analysis is particular important in the course of petroleum exploration and development. The geological structure complexity, its boundary problem, the loading paths, etc. are difficult problems in the numerical simulation of tectonic stress field; and the field stress data is very limited. Because of the unknown tectonic movement and complicated geological structure, tectonic stress field cannot be calculated immediately. The boundary load inversion is a particular important means for tectonic stress field analysis. Starting from the fundamental equations of elastic mechanics, the inverse problem of tectonic stress field of oil-gas reservoirs is proposed. Based on the least square method, a method is presented to identify and calculate inversely the boundary load on the geological model by the stresses in the geological model. The finite element method and the finite difference method are combined to apply the method that chooses the boundary loads as fitting parameters in the objective function. The calculated results are in good agreement with the in-situ measured data. This method has excellent practical value and can provide references to the back analysis of tectonic stress field. This method and model can get over the shortage of common back analysis method such as adjusting boundary loads and regression method; so it can calculate exactly the tectonic stress field by back analysis. The results show that the method is simple, credible and has high precision and rapid calculation velocity. Therefore, it may find its uses in the boundary load inversion of tectonic stress field. This method can provide references to petroleum exploration and production.

Key words: tectonic stress field; finite elements; least square method; finite element inverse analysis

1 引 言

地应力场是地球发展运动的结果, 它决定于历次构造运动而产生的应力, 地球升降运动引起的加荷、卸荷、岩浆活动的温差应力、岩体物理力学性质的变化等。从地质力学观点看, 地应力场是由构造应力场和自重应力场迭加而成的, 构造运动方向应该是水平的。自重应力和构造应力的计算精度是

完全不同的, 岩体的重度可以较为准确地确定。它的变化范围也不大, 根据地形的条件, 用有限元法计算自重应力在精度上满足工程要求, 不必对它进行反演, 可视为已知值; 构造应力场的情况就有所不同^[1]。在油气勘探开发中, 地应力场研究的重要性, 迫切需要知道地应力场的分布状态, 但人们所知道的仅是某一区域几个井点的测量资料, 而要知道整个区域的应力场状态, 这就需进行反演。目前

收稿日期: 2008-11-11

第一作者简介: 付玉华, 男, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学与采矿工程教学与研究。E-mail: fyh1369@sohu.com

在构造应力场数值模拟和分析中, 人们都有条件的根据现场量测资料进行研究区域构造应力的分析, 应用较多的数值分析方法是边界载荷试凑法或边界载荷调整法^[2-4]。由于地质构造的复杂性和地应力资料的有限性, 使构造应力场研究的边界条件、加载方式等成为数值模拟计算分析中的难题, 因为构造运动未知, 无法直接求解。对构造应力场的模拟而言, 以现场实测数据为基础, 考虑地形、地质等方面的特点进行相应的理论或数值方法进行反分析、回算和模拟, 以推断构造应力量值和构造应力模式是一种重要而又较为有效的途径之一^[5-7]。本文提出的边界载荷识别方法, 直接以应力测试资料为参数, 采用阻尼最小二乘法逼近载荷值, 算法的迭代初值采用单位载荷法, 使得该算法不受地层的几何构造特征和边界条件限制, 就可用于地应力场不确定未知边界载荷的识别, 较好地解决了构造应力场边界载荷的反演问题。

2 有限元计算模型

由于地质构造及边界条件等的复杂性, 难以得到地层对边界载荷相应的解析解, 为了使研究的方法具有广泛的适用性, 对地层进行力学分析时采用有限元法。将储层应力场视为弹性问题, 对于某一研究区域, 在外加荷载的作用下其内部将产生位移场、应力场和应变场, 小变形的弹性力学问题的基本方程为

$$\text{平衡微分方程: } L^T \sigma + Q = 0 \quad (1)$$

$$\text{几何方程: } \varepsilon = LU \quad (2)$$

$$\text{物理方程: } \sigma = D\varepsilon \quad (3)$$

式中: L 为微分算子矩阵; σ 为应力矩阵; Q 为体力矩阵; ε 为应变矩阵; D 为弹性矩阵, 它完全取决于地层的弹性模量 E 和泊松比 μ 。

一般有限元公式为

$$KU = F(X) \quad (4)$$

式中: K 为总体刚度矩阵; U 为节点位移阵; $F(X)$ 为边界载荷列阵; X 为描述储层所承受边界载荷的参数向量。

式(4)变换为

$$U = K^{-1}F(X) \quad (5)$$

将式(3)代入式(2), 可得

$$\sigma = DLU \quad (6)$$

将式(5)代入式(6), 可得

$$\sigma = DLK^{-1}F(X) \quad (7)$$

由式(7)可以得到节点应力与边界载荷满足如下关系:

$$\sigma = TF(X) \quad (8)$$

令 $T = DLK^{-1}$, 这里 T 即为节点应力阵与边界载荷列阵之间的理论传递矩阵。对于线弹性体, 地层有限元结构模型确定后, T 即可认为是确定的。在本文中由于载荷未知, 所以 $F(X)$ 未知, 由于在待研究区块储层中只有部分油水井的应力值已知, 因此 σ 也只有部分已知, 一般情况下不可能通过式(8)求出边界载荷参数向量 X 。

3 反演模型

构造应力场反演就是在一定的准则下寻找能够最优拟合实际观测数据的模型或参数。反演解与衡量数据拟合程度的最优准则密切相关, 它是这一最优准则下的最优解。有时对所研究的区域或区块, 已作过相关学科的研究, 往往已有一定程度地了解, 即对模型(参数)具备了一些先验信息。利用这些先验信息, 可对优化准则或参数加以约束。储层应力场获取的观测数据通常为区域部分井的压裂、井壁崩落或岩心测试等的应力, 反演即为应力反演。若采用最小二乘法作为最优化准则, 则应力反演的准则(或目标函数)表示成如下两个模型:

(1) 约束模型 若已知研究区域或区块储层的水平应力场 σ_L (观测)、理论位移场 σ (有限元计算值), 则模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min \Phi(X) &= (\sigma - \sigma_L)^T (\sigma - \sigma_L) \\ \text{s.t. } h_1 &\leq \varphi(X) \leq h_2 \\ a_i &\leq X_i \leq b_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: σ 由有限元数值计算而得; X 为待求边界载荷向量; h_1 、 h_2 为根据先验知识确定的边界载荷参数函数的上下界; a_i 、 b_i 为根据先验知识确定的边界载荷参数的上下界。

(2) 无约束模型 当式(9)中的条件不存在时, 即为无约束模型:

$$\min \Phi(X) = (\sigma - \sigma_L)^T (\sigma - \sigma_L) \quad (10)$$

式中各符号同式(9)。

4 反演算法

求解上述反问题的基本思路是, 先预置边界载

荷的参数向量 $\mathbf{X}$, 采用有限元方法计算该参数向量 $\mathbf{X}$ 作用下储层的应力响应值, 使其在最小二乘意义下逼近储层部分井点的实测值。求解式(9)或式(10)的最小二乘问题一般采用 Gauss-Newton 法, 但有时会产生方程系数矩阵的病态, 并出现迭代效率低和搜索方向假收敛等问题, 本文采用阻尼最小二乘法 (Levenberg-Marquardt) [8] 逼近边界载荷参数向量 $\mathbf{X}$ 。

在第 k 步迭代时, 记应力响应列向量为 σ^k , 边界载荷列向量为 $\mathbf{X}^k$, 将应力响应列向量 σ^k 在边界载荷列向量为 $\mathbf{X}^k$ 的邻域内展开成级数形式, 并略去 2 阶以上微量得

$$\sigma^k = \sigma^{k-1} + \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{X}} (\mathbf{X}^k - \mathbf{X}^{k-1}) = \sigma^{k-1} + \mathbf{J} (\mathbf{X}^k - \mathbf{X}^{k-1}) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{J}$ 为应力响应 σ^k 在参数 $\mathbf{X}^k$ 处的 Jacobi 矩阵, 可以通过有限差分法近似求得

$$J_{ij} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial X_j} \approx \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta X_j} = \frac{\sigma_i(X_1, X_2, \dots, X_j + \Delta X_j, \dots, X_n) - \sigma_i(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n)}{\Delta X_j} \quad (12)$$

式中的 σ_i 通过式 (7) 计算求得。

Levenberg-Marquardt 方法使用的搜索方向是一组线性等式的解, 迭代公式为

$$\left[\mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \mathbf{J} (\mathbf{X}^{(k)}) + \lambda_k \mathbf{I} \right] \{ \Delta \mathbf{X}^{(k)} \} = -\mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \{ \sigma^{k-1} - \sigma_L \} \quad (13)$$

式中: $\{ \Delta \mathbf{X} \}$ 为参数向量 $\mathbf{X}$ 的搜索方向向量; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; 标量 λ_k 称为阻尼因子, 在迭代过程中控制 $\Delta \mathbf{x}_k$ 的方向与大小。当 $\lambda_k = 0$ 时, $\Delta \mathbf{x}_k$ 的方向与 Gauss-Newton 法的结果一致; 当 $\lambda_k \rightarrow \infty$ 时, 由式 (13) 可得

$$\left[\mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \mathbf{J} (\mathbf{X}^{(k)}) + \lambda_k \mathbf{I} \right] \{ \Delta \mathbf{X}^{(k)} \} \approx \lambda_k \mathbf{I} \{ \Delta \mathbf{X}^{(k)} \} = -\mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \{ \sigma^{k-1} - \sigma_L \} \quad (14)$$

从而

$$\{ \Delta \mathbf{X}^{(k)} \} = -\frac{1}{\lambda_k} \mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \{ \sigma^{k-1} - \sigma_L \} \quad (15)$$

则有 $\Delta \mathbf{x}_k \rightarrow 0$ 向量, 且具有最陡峭的下降斜率, 这意味着对于充分大的 λ_k , 有

$$\Phi(\mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}) < \Phi(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (16)$$

由式 (13) 可得

$$\{ \Delta \mathbf{X}^{(k)} \} = -\left[\mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \mathbf{J} (\mathbf{X}^{(k)}) + \lambda_k \mathbf{I} \right]^{-1} \times \mathbf{J}^T (\mathbf{X}^{(k)}) \{ \sigma^{k-1} - \sigma_L \} \quad (17)$$

故有

$$\{ \mathbf{X}^{(k)} \} = \{ \mathbf{X}^{(k-1)} \} + \{ \Delta \mathbf{X}^{(k)} \} \quad (18)$$

边界载荷向量 $\mathbf{X}$ 由式 (13)~(18) 迭代求解, 直到满足精度要求为止。迭代初值的选择是关键因素, 若边界载荷的范围已知, 参数 $\mathbf{X}$ 的迭代初值一般取为该参数上下限的平均值。若参数值域为无界域, 则参数 $\mathbf{X}$ 的迭代初值可通过试算后根据经验选取。

从以上的分析可知, 如果测量的储层应力是确定的, 则边界载荷也是确定的, 载荷参数向量与储层的水平应力 σ_L (观测) 满足下列矩阵方程:

$$\mathbf{G}\mathbf{X} = \{ \sigma_L \} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{G} \in \mathbf{C}^{m \times n}$ 为传递矩阵, m 为测点数; n 为边界载荷向量的维数, $m > n$ 。

有限元反演构造应力场的具体做法为: 选定一种合理的目标函数, 利用最优化方法调整、搜索参数, 用有限元数值算法正演计算值, 将观测值与计算值代入目标函数, 判断目标函数的大小, 若目标函数没有达到极小, 用优化方法继续调整、搜索参数, 重复上述过程, 直到目标函数达到极小值, 从而获得边界载荷参数, 用反演得到的边界载荷进行正演计算, 从而可以获得储层的应力场。反演过程见图 1。

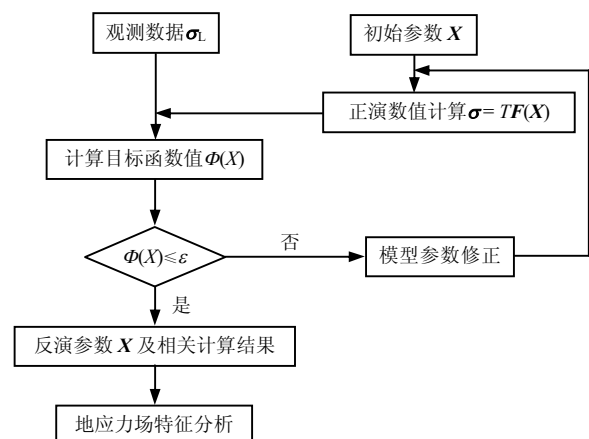


图 1 有限元反演解算过程

Fig.1 Flow diagram of finite element inversion

5 应用

应用上述理论,借助有限元计算软件,编制了反求构造应力场边界力的有限元迭代计算程序。本文以东营凹陷西南部梁家楼油田纯41断块沙四段现今地应力场为例,研究构造应力场边界载荷反求技术在石油地质学中的应用。

5.1 工程概况

纯41断块为被两条北北向倾向断层夹持的北东东向断块,东邻牛庄洼陷,西北为利津洼陷,南以纯北断层为界与纯化油田相邻(图2)。该断块西南部高东北部低,主要储集层为细砂岩为主的沙四段,地层倾向和倾角变化都很明显。

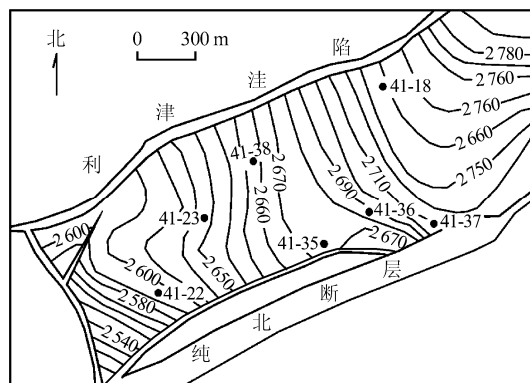


图2 纯41断块沙四段顶面构造图(单位:m)

Fig.2 The structure location map of the top surface of Sha4 member in Chun41 block(unit: m)

5.2 计算模型

地质模型是做好地应力场数值模拟的先决条件,将目的层作为一个岩石块体的隔离体作为模拟的对象,为了消除边界条件影响,在地质隔离体的基础上将研究区扩大。计算区域的确定一般应遵循以下两个原则:①几何范围适当增大,以减少边界条件对研究区的影响;②边界处几何约束条件易于确定。地下沉积岩体多为层状分布,故可以在综合数学模型中以弹性力学的平面问题来考虑。图3为研究区域的力学模型,为一正方形计算区域,边长为5.5 km,模型中考虑了4个断裂带。

目前确定地质体不同构造部位的岩石物理参数一般从宏观效果出发,近似地将地质体作为分块均匀的岩石体;断层按断裂带处理,将断层两侧适当距离内充填岩性的强度减弱,岩石的弹性模量、抗拉强度、抗剪强度等力学参数相对同深度相同的岩性降低一定的比例,根据几个油田的经验,该比例一般定在60%,并将岩石的泊松比适当加大^[9-10]。研究区域为均质、各向同性材料,断裂带弹性模量

取 2.88×10^4 MPa,泊松比取0.26;断块单元弹性模量取 4.80×10^4 MPa,泊松比取0.21。将整个计算区域划分为2704个单元,其中断裂带及其附近所选的单元边长都比较小,网格比较密集,其他部分的网格则比较大。同时对有可能出现“小角度单元”的区域,采用“疏密”技术。

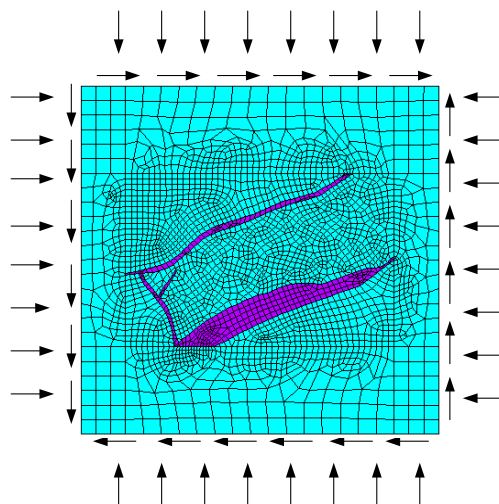


图3 计算区域力学模型

Fig.3 Mechanical model of calculated area

地应力场的主要组成部分为自重应力场和构造应力场,考虑到岩体的重度可以较为准确的测定,用有限元法算出的自重应力可以满足计算精度的要求,可按已知条件处理。地质力学观点认为,构造运动主要是水平的,构造应力场的分布规律受构造运动的影响,由于构造运动未知,构造应力场获取比较困难,无法直接求解,需考虑多种因素^[11-12],本文将以下8种因素作为地质构造力的基本因素:东、西、南、北方向的挤压或拉张力;东、西、南、北方向的剪切力。通过改变8个边界力的大小,可以模拟东西、南北方向的挤压或拉张以及模拟水平面内的剪切变形,由此获得研究区域局部的构造应力场分布,同时还应施加边界力约束,使边界力的合力及合力矩为0,边界力加载方式如图3所示。由于该断块的边界断层在现今地应力作用下没有活动,所以不将断层作为边界,考虑边界条件施加的方便,模型东边界两个边缘点固定,以保证研究区块没有整体的刚体平移和转动。

5.3 数值反演试验

为了验证本文所提出的反演算法的可靠性,用一个已知解的问题进行数值验证,模型采用沙四段地质力学模型。

(1) 模型边界条件: ①模型南、北、东、西受均布压应力作用, 记为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 受力大小依次为: 10、10、15、15 MPa; ②模型南、北、东、西受均布剪应力作用, 记为 P_5 、 P_6 、 P_7 、 P_8 , 受力大小均为 5 MPa。边界力作用方式见图 3。

(2) 反演参数选择: 用正演有限元计算上述力学模型, 得到研究区域的应力场, 选择 7 个测点正演计算的水平应力分量 (σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy}) 作为已知值 (理论值), 用 21 个已知值反演研究区域的边界力, 测点的分布见图 2。各测点的正演计算结果见表 1。

表 1 测点反演结果与实际值的比较

Table 1 The comparison between inverted results and theoretic results of tested nodes

测点号	应力分量	反演值 / MPa	理论值 / MPa	误差分析 / %
41-22	σ_x	-14.436	-14.182	1.791
	σ_y	-9.812	-9.565	2.582
	τ_{xy}	4.731	4.934	4.114
41-23	σ_x	-15.151	-14.878	1.835
	σ_y	-10.047	-9.698	3.599
	τ_{xy}	4.883	5.047	3.249
41-18	σ_x	-15.628	-15.466	1.047
	σ_y	-10.546	-10.052	4.914
	τ_{xy}	5.138	4.994	2.883
41-35	σ_x	-15.742	-15.557	1.189
	σ_y	-10.175	-9.810	3.721
	τ_{xy}	4.683	4.630	1.145
41-36	σ_x	-15.678	-15.498	1.161
	σ_y	-10.604	-10.132	4.659
	τ_{xy}	5.180	5.071	2.149
41-37	σ_x	-15.501	-15.391	0.715
	σ_y	-10.369	-9.847	5.301
	τ_{xy}	5.128	4.889	4.889
41-38	σ_x	-15.401	-15.111	1.919
	σ_y	-10.194	-9.749	4.565
	τ_{xy}	4.960	5.078	2.323

(3) 计算条件: 边界压应力约束值下限均为 1 MPa, 上限均为 100 MPa。边界剪应力约束值下限均为 -50 MPa, 上限均为 50 MPa。迭代终止精度为 10^{-5} MPa²。

(4) 反演结果: 基于以上条件, 反演得到的测点计算值列于表 1, 边界载荷反演结果见表 2。从表 2 中可见, 在测点为 7 个、已知值个数为 21 个、迭代终止精度为 10^{-5} 的情况下, 所反演出的应力值都

达到或非常接近测试值的结果, 相对误差基本控制在 5 % 以内, 反演结果的精度完全满足工程实际的要求。

表 2 利用应力数据反演区块边界力

Table 2 Inverting the driving forces on the boundaries of block by stress data

边界力	反演值 / MPa	实测值 / MPa	误差分析 / %
P_1	10.485	10	4.850
P_2	10.485	10	4.850
P_3	14.874	15	0.840
P_4	14.874	15	0.840
P_5	5.183	5	3.660
P_6	5.183	5	3.660
P_7	5.183	5	3.660
P_8	5.183	5	3.660

5.4 沙四段构造应力场反演

用有限元法计算地应力, 边界条件是决定性因素, 尤其远场应力 (水平向边界力) 是决定场内应力性质的关键, 可用储层的平面模型来反演水平边界力 (远场应力)。

(1) 模型边界条件: 位移边界条件及边界力作用方式与数值反演试验相同 (图 3), P_1 和 $P_4 \sim P_8$ 的初始值分别为: 50 MPa、60 MPa、5 MPa。

(2) 反演参数选择: 根据研究区块现场测试资料^[13], 选择 7 个测点的水平应力分量作为已知测试值, 用 21 个测试值反演研究区域的 8 个未知边界力, 测点的分布见图 2, 7 个测点的实测资料见表 3。

(3) 计算条件: 边界压应力约束值下限均为 10 MPa, 上限均为 80 MPa; 边界剪应力约束值下限均为 -20 MPa, 上限均为 20 MPa, 迭代终止精度为 10^{-5} , 同时还应考虑边界力约束, 使边界力的合力矩为 0, 由式 (9) 可得到相应的约束反演模型。

(4) 反演结果: 基于以上条件, 反演得到的测点计算值见表 3, 边界载荷反演结果见表 4。从表 3 中可以看出, 测点应力分量 σ_x 与 σ_y 的相对误差基本控制在 5 % 以内 (除井点 41-35 外); 剪应力分量的相对误差在 12 % 以内, 大多数测点控制在 10 % 以内。各井点所反演出的应力值都达到或非常接近测试值, 相对误差基本控制在 10 % 以内, 反演结果的精度基本满足工程实际的要求。反演出的水平构造边界力最优值见表 4。

表3 测点反演结果与实际值的比较

Table 3 The comparison between inverted results and observed results of tested nodes

测点	应力分量	反演值 / MPa	实测值 / MPa	误差分析 / %
41-22	σ_x	-64.425	-64.055	0.578
	σ_y	-54.380	-52.545	3.492
	τ_{xy}	-7.242	-6.919	4.668
41-23	σ_x	-65.337	-64.585	1.164
	σ_y	-53.410	-51.515	3.679
	τ_{xy}	-6.219	-6.826	8.892
41-18	σ_x	-65.150	-65.969	1.241
	σ_y	-52.801	-52.231	1.091
	τ_{xy}	-5.376	-5.816	7.565
41-35	σ_x	-67.933	-68.330	0.581
	σ_y	-51.634	-55.270	6.579
	τ_{xy}	-5.409	-4.846	11.619
41-36	σ_x	-65.788	-66.296	0.766
	σ_y	-52.627	-52.304	0.618
	τ_{xy}	-4.518	-4.081	10.708
41-37	σ_x	-65.296	-64.393	1.402
	σ_y	-53.045	-53.606	1.047
	τ_{xy}	-5.185	-5.634	7.969
41-38	σ_x	-65.476	-65.968	0.746
	σ_y	-53.263	-54.031	1.421
	τ_{xy}	-5.452	-4.905	11.152

表4 边界力最优结果值

Table 4 The optimum results of boundary loads

(MPa)							
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
53.94	53.94	64.36	64.36	-4.95	-4.95	-4.95	-4.95

在计算模型边界施加所反演出的边界力最优结果进行正演计算, 由此可以获得该油田沙四段的应力场分布。

6 结 语

地应力场反演存在着解的非唯一性问题, 采用施加先验约束的方法来改善解的非唯一性。本文从弹性力学基本方程出发, 建立了地应力数值反演模型, 运用地质力学分析方法综合考虑了构造应力场的基本影响因素, 提出了关于构造应力场边界载荷的有限元反演方法, 通过对部分应力的拟合能够识别出构造应力场的边界力, 而且反演结果的精度很好, 该方法的实用性较好, 几乎不受地质模型的几何特征和边界条件等的限制。故该方法可用于构造应力场边界载荷的反演问题。

参 考 文 献

- [1] 朱伯芳. 岩体初始应力场反分析[J]. 水利学报, 1994, (10): 30—35.
- [2] 陈立德, 蒙启安, 万天丰, 等. 松辽盆地古龙凹陷构造应力场弹塑性增量法数值模拟[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 483—491.
- [3] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊, 等. 含油气盆地三维构造应力场数值模拟方法[J]. 地质力学, 1997, 3(1): 71—80.
- [4] 陈书平, 戴俊生, 宋全友, 等. 胶莱盆地构造应力场特征及数学模拟[J]. 石油大学学报, 1998, 22(3): 19—25.
- [5] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [6] 郭明伟, 李春光, 王水林, 等. 优化位移边界反演三维初始地应力场的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1269—1274.
- [7] 侯明勋, 葛修润. 岩体初始地应力场分析方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1269—1274.
- [8] 薛履中. 工程最优化技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998: 50—62.
- [9] 陈波, 田崇鲁. 储层构造裂缝数值模拟技术的应用实例[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 50—54.
- [10] 刘大听, 张淑娟, 董亨茂. 任丘潜山油藏裂缝预测及剩余油分布研究[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 49—54.
- [11] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [12] 杨志法, 王思敬, 冯紫良, 等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
- [13] 戴俊生, 李理. 油区构造分析[M]. 东营: 石油大学出版社, 2002.