

* 学术论文 *

相似准则数值优化方法及其应用*

周济福 李家春

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘要 提出了复杂流动相似准则的数值优化方法, 即通过敏感性分析, 从众多无量纲参数中筛选控制流动的主要相似参数. 给出了敏感因子的定义, 讨论了敏感因子与无量纲量间的依赖关系. 并利用该方法对油藏渗流的相似准则进行研究, 与理论分析进行对比, 得到完全一致的结论. 进一步对模型与原型压力分布的误差进行了合理的解释. 最后分析了流动参数对敏感因子的影响, 发现复杂流动的主要相似准则可能随实际流动参数的不同而变化.

关键词 相似 优化 敏感性分析 复杂流动 模型

除理论研究、数值分析和现场观测外, 物理模型实验是研究自然界复杂流动问题的另一基本途径. 物理模型实验以相似理论为基础, 从相似模型的观测数据分析原型的流动规律. 然而, 相似模型要求模型与原型中的所有无量纲参数必须完全一致, 这对于工业和环境中的复杂流动问题, 如: 多尺度、多相、多组分流动, 往往是难以满足的, 因为这类流动问题包含许多物理、化学参数^[1,2], 且涉及尺度变化、相间和组分间的物理、化学、甚至生物过程^[3], 而且更重要的是, 与这些物理、化学参数和过程有关的众多无量纲量之间往往相互矛盾, 或者在实验室很难满足. 例如: 模拟自然界的水沙两相流动时, 泥沙沉降和起动的相似准则是不可能同时满足的; 船舶运动的物理模拟实验中, Froude 数和 Reynolds 数不能同时保持与原型一致^[4]; 对于多孔介质渗流, 尤其是注水和注聚合物开采石油的过程中, 渗流运动不仅与岩层和流体的性质有关, 而且还涉及对流、扩散、相间物质交换、界面吸附和解吸等^[5,6]各种物理、化学过程, 无量纲参数往往多达数十个, 且相互间常常不能保

持一致. 因此, 设计这类复杂流动的完全相似模型几乎是不可能的.

郑哲敏、谈庆明^[7]指出对于不能完全模拟的问题, 采用局部模拟常常是可行的, 即对控制主要物理现象和过程的无量纲参数进行完全模拟, 而放松对其他次要因素的要求, 如: 河流模拟往往不得不放松几何相似要求而采用变态模型^[8]. 确定主要相似准数的方法有两种: 一种是基于物理分析的方法, 即根据所研究问题的物理实质确定主要相似准数. Taylor^[9]对强爆炸问题的分析便是一个典型的范例; 郑哲敏^[10]基于对爆炸成形机理的深刻分析, 提出了爆炸成形模型律; Doan^[11]研究了油藏工程中水平井附近的三相非等温流动, 从控制方程获得了相似准则; Sedov^[4]对这类经典力学问题的相似理论进行了精辟的论述. 另一种是近来开始出现的基于数值分析的方法, 即通过研究目标函数对各相似准数的敏感性来确定主要的相似准数. Mackinnon^[3]建立并利用生态系统的多相、多组分数学模型, 进行敏感性分析, 研究了无量纲参数对系统生物转换率 (biotransformation rates) 的影响; 彭克

2005-02-28 收稿, 2005-04-20 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10332050)和国家“九七三”计划项目(No. 2005CB221304)资助

E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

踪等^[12]初步研究了石油采收率对无量纲量的敏感性,但他们所定义的敏感系数没有一般性,且没有考虑到无量纲量的取值对敏感系数的影响.比较而言,物理分析的方法要以对物理实质的深入分析为基础,而数值方法则更具一般性,但目前这方面的研究还只是初步的,有待进一步完善.

本文提出一种优选主要相似准数的普适数值优化方法,即在确定目标函数后,利用数学模型研究目标函数对每一无量纲量的敏感因子,根据敏感因子的大小获得主要相似准数.给出了敏感因子的确切定义,讨论了无量纲量取值对敏感因子的影响,以及利用有量纲和无量纲数学模型进行敏感性分析的区别等.将该方法应用于油藏渗流运动相似律的研究,得到的数值结果与理论分析完全一致,并通过油藏压力分布的误差分析,进一步论证了该方法的可行性.最后,还研究了原油粘性、渗透率对敏感因子的影响.

1 相似准则的优化方法

对于一个多变量的复杂流动系统,目标函数可表述为

$$f = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_N), \quad (1)$$

其中 f 为某一目标函数, π_k 表示描述该复杂流动的无量纲量, $k=1, 2, 3, \dots, N$, N 为无量纲量的个数.

如前所述,要设计一个合理而又可行的复杂流动模型,必须明确其中的主要无量纲量,可以通过目标函数对每一无量纲量的敏感性进行衡量,定义敏感因子

$$s_k = \left| \frac{\partial f}{\partial \pi_k} \right|, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

敏感因子越大,与之对应的无量纲量对目标函数的影响越大.因此,可以根据敏感因子的值来区分无量纲量的主次关系.

值得注意的是,由于目标函数是所有无量纲量的函数,且这种函数关系一般并不是线性的,因此敏感因子也一定是所有无量纲量的函数,也就是说,每一敏感因子会随它所对应的无量纲量的值而变化.因此,即使是同一种复杂流动系统,如果流动的尺度不同,无量纲参数会取不同的值,由敏感

因子确定的无量纲量的主次关系也会产生变化.

从应用的角度讲,有必要由物理量的相对变化率来重新定义敏感因子,即

$$s_k = \left| \frac{\partial(f/f_p)}{\partial(\pi_k/\pi_{k,p})} \right|_{\pi_k = \pi_{k,p}}, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

这里, $f_p = f(\pi_{1,p}, \pi_{2,p}, \dots, \pi_{N,p})$, $\pi_{k,p}$ 为第 k 个无量纲量 π_k 的原型值, s_k 表示当第 k 个无量纲量 π_k 取某一特定值 $\pi_{k,p}$ 时,目标函数 f 对 π_k 的敏感性.

一般来讲,对于复杂流动的情况,目标函数与各无量纲量之间的函数关系很难显式地表达,因此,敏感因子不能直接通过解析求导运算得到.此时,可利用数学模型进行数值求解.但必需注意,如果采用有量纲方程的数学模型,则某一有量纲量的改变将导致所有与之有关的无量纲量的变化,由此获得的敏感因子将没有意义.因此,在进行敏感性分析时,应采用基于无量纲方程的数学模型,这样通过改变某一无量纲量所得到的敏感因子便确实排他地反映了该无量纲量对目标函数的影响.此外,在数值求解敏感因子时,需要用差分近似式(3)中的微分,由于目标函数与 π_k 之间的非线性关系, π_k 的变化不宜太大,本文取 $\Delta\pi_k/\pi_{k,p} = 1\%$,其中 $\Delta\pi_k$ 为模型第 k 个无量纲量与其原型值的偏离.

2 算例研究:典型油藏多孔介质流动的相似准则

为了更清楚地说明本文提出的数值优化方法的可行性,我们假设一个具有矩形规则边界的二维油藏,如图 1. 其中布置有两口采油井,油藏边界 BC 和 OA 为不透水边界, OB 和 AC 为定压边界.该油藏中的渗流运动具有解析解,且流动的相似准则可以从理论上进行清晰的描述,便于检验本文的数学模型以及采用数值优化方法所获得的有关相似准则的结论.该油藏中的压力分布可由下述定解问题来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{\mu}{K} q_i \delta(x - x_i, y - y_i) = \frac{1}{\chi} \frac{\partial p}{\partial t} \\ p|_{x=0} = p_0, p|_{x=l_x} = p_l \\ \frac{\partial p}{\partial y}|_{y=0} = 0, \frac{\partial p}{\partial y}|_{y=l_y} = 0 \\ p(x, y, 0) = p_i \end{cases}, \quad (4)$$

其中, $\chi = \frac{K}{\phi\mu c_i}$ 称为流度, K 为渗透率, ϕ 为介质的孔隙度, μ 为原油粘性系数, c_i 表示原油和多孔介质压缩效应的总压缩系数. (x_i, y_i) 为采油井的位置坐标, q_i 为采油井产量(应取负值), 如为正值, 则表示注入井的注入流量, δ 是 Dirac Delta 函数, p_0, p_l 和 p_i 均为常数, 分别表示边界压力和油藏中的初始压力.

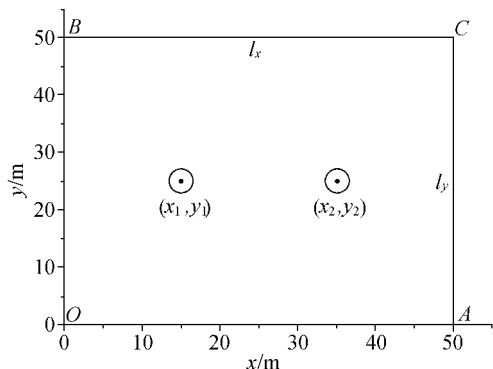


图1 矩形二维油藏及其中采油井位置示意图

2.1 理论分析

可以通过对基本方程的无量纲化来获得相似准数. 对于定解问题(4)所描述的二维流动, 引入如下无量纲参数

$$p_D = \frac{p - p_0}{p_l - p_0}; x_D = \frac{x}{L}; y_D = \frac{y}{L};$$

$$t_D = \frac{t}{T} = \frac{\chi}{L^2} t, \quad (5)$$

其中, L 和 T 分别为表征油藏渗流运动的长度尺度和时间尺度, 则得到无量纲压力方程

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + \frac{\mu}{K(p_l - p_0)} \cdot \sum_{i=1}^2 q_i \delta(x_D - x_{iD}) \delta(y_D - y_{iD}) = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (6)$$

显然, 该方程中 $\pi_1 = \frac{\mu q_1}{K(p_l - p_0)}$ 和 $\pi_2 = \frac{\mu q_2}{K(p_l - p_0)}$ 为两个相似准数, 它们所表达的物理含义可理解为: 采油井的无量纲产量, 或采油井单位厚度产量与单位厚度油藏的平均渗流量之比.

为了在实验室准确模拟这种二维油藏中的压力分布, 必须设计一个完全相似模型, 这就要求, 模型中的两个无量纲数 $\pi_{1,m}, \pi_{2,m}$ 必须与原型中对应的两个无量纲数 $\pi_{1,p}, \pi_{2,p}$ 完全相等, 这里下标 m, p 分别表示模型和原型中的量(下同). 然而, 如果可以事先确定 $\pi_{1,p} \gg \pi_{2,p}$, 例如: 采油井 1 的产量远大于采油井 2 的情形, 则由无量纲方程可知相对于相似准数 π_1, π_2 对压力分布的影响很小. 在这种情形下, 如果放松或者甚至放弃对次要相似准数 π_2 的相似要求, 而仅考虑主要的相似条件 $\pi_{1,m} = \pi_{1,p}$, 则由此局部相似模型得到的压力分布将可以近似地反映原型压力分布的特征, 而不至于有太大的误差. 这正是处理含多个相似准数、且相互之间不可能同时满足的复杂流动相似问题的有效方法. 即使所有的相似准数可以同时满足(如这里的两个无量纲参数间没有矛盾, 如果实验设备精度足够, 是可以保证两者同时相似的), 也还有一个误差控制的问题, 对于对目标函数影响较大的敏感参数, 必须严格控制实验误差的范围. 因此, 对于复杂流动的相似问题, 重要的是要确定所有无量纲量的主次关系, 以区分哪些无量纲量的相似要求是必须满足的, 哪些无量纲量的限制是可以放松的. 也即是说需要对主要无量纲量进行组合优化分析, 使模型的目标函数以最小的误差与原型近似相似. 建立数学模型, 并进行敏感性分析, 是达到这一目的的有效途径. 通过数值分析, 可以获得忽略某些次要相似准数给目标函数带来的误差, 同时, 还可以确定: 在保证目标函数近似相似的前提下, 次要相似准数可以被放松的程度. 下面, 我们对上述典型渗流的相似规律进行数值分析, 以阐述数值方法的可行性.

2.2 数值模型验证

采用有限差分方法对方程(4)进行离散求解, 时间差分为前差格式、空间差分为中心格式, 区域剖分布置非均匀结构网格, 在采油井附近进行网格加密, 以分辨采油井周围大梯度的压力分布. 在 $|x - x_i| / l_x < 0.1$ 的区域, $\Delta x / l_x = 0.02$, 在 $|y - y_i| / l_y < 0.1$ 的区域, $\Delta y / l_y = 0.02$, 其他区域, $\Delta x / l_x = 0.1, \Delta y / l_y = 0.1$. 时间步长满足稳定性条件 $\Delta t \leq \frac{(\min(\Delta x, \Delta y))^2}{2\chi}$.

考虑渗透率 K 、岩层孔隙度 ϕ 、石油粘性系数 μ 以及总压缩系数 c_t 均为常数的情况, 此时, 方程 (4) 为一线性方程, 应用分离变量法和 Duhamel 原理, 可以得到压力的时空分布

$$p = p_0 + \frac{x}{l_x}(p_1 - p_0) + \sum_{i=1}^2 \frac{q_i \mu}{K} \frac{2l_x}{l_y \pi^2} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-\chi \frac{m^2 \pi^2}{l_x^2} t\right)}{m^2} \sin \frac{m\pi}{l_x} x \sin \frac{m\pi}{l_x} x_i + \sum_{i=1}^2 \frac{q_i \mu}{K} \frac{4l_x l_y}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-\chi \left(\frac{m^2 \pi^2}{l_x^2} + \frac{n^2 \pi^2}{l_y^2}\right) t\right)}{m^2 l_y^2 + n^2 l_x^2} \cdot \sin \frac{m\pi}{l_x} x \cos \frac{n\pi}{l_y} y \sin \frac{m\pi}{l_x} x_i \cos \frac{n\pi}{l_y} y_i + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp\left(-\chi \frac{m^2 \pi^2}{l_x^2} t\right) \sin \frac{m\pi}{l_x} x \cdot \left[\frac{p_i - p_0}{m} (1 - \cos m\pi) + \frac{p_l - p_0}{m} \cos m\pi \right],$$

利用该解析解来验证数学模型, 验证算例的参数选择如表 1 算例 a. 图 2 给出了油藏中不同位置处压力随时间的变化, 实线为解析解、点据为数值解. 由图可见, 除了采油井处压力时间过程的数值解与解析解略有偏离外, 其他典型空间点处两者完好符合, 如果进一步加密井周围的空间网格, 这一误差会随之减小;

另外, 由于初始压力分布是任意给定的, 所以在起始时刻附近, 压力数值解与解析解也有一定偏离, 但这种由初始压力分布带来的影响随时间很快消失. 当压力基本不随时间变化时, 其空间分布的数值解与解析解比较如图 3, 两者的符合程度是令人满意的.

表 1 算例参数表

算例	a	b
K / D^*	1.0	
$\mu / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	2.0	
c_t / Pa^{-1}	1.0×10^{-9}	
ϕ	0.2	
p_0 / MPa	10	1
p_l / MPa	30	3
p_i / MPa	10	1
L / m	50	5
$q_1 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	-0.01	-0.001
$q_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	-0.001	-0.0001
$l_x = l_y / \text{m}$	50	5
x_1 / m	15	1.5
y_1 / m	25	2.5
x_2 / m	35	3.5
y_2 / m	25	2.5
T / s	1000	10

* $1D = 9.87 \times 10^{-9} \text{cm}^2$

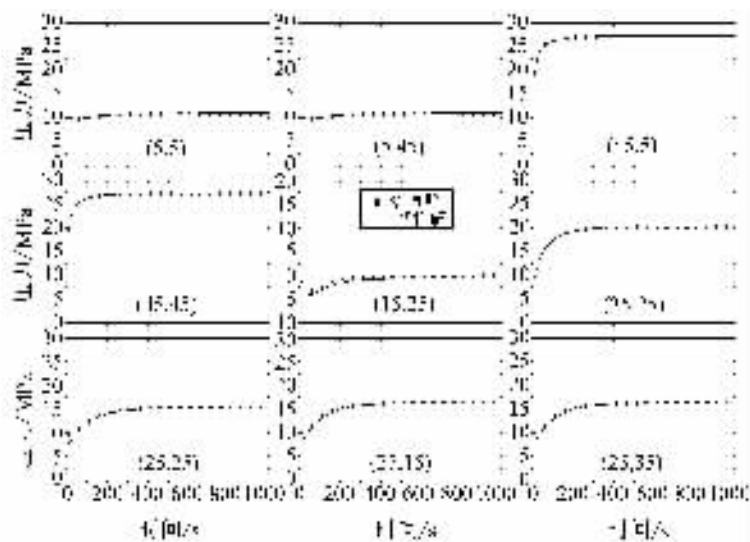


图 2 油藏中不同位置 (括弧内的数据为位置坐标) 处压力随时间变化的数值解 (以点表示) 与解析解 (以实线表示) 之比较
两口采油井分别位于 (15, 25)、(35, 25) 处

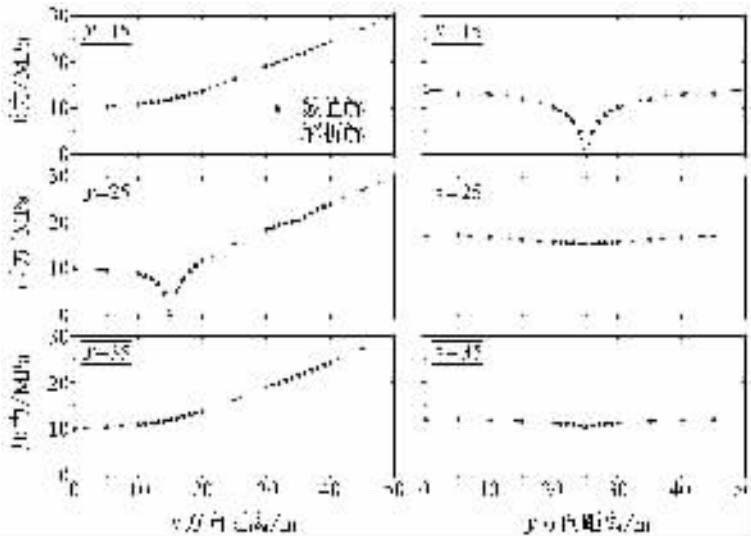


图 3 x, y 方向不同剖面上压力的空间分布
实线为解析解, 点据为数值解, 其中 $y=25$ 的剖面经过两口采油井

2.3 压力分布对相似准数的敏感性分析

表 1 中算例 b 是算例 a 的一个缩尺模型, 其几何尺寸和流动参数均严格按照完全相似的条件来选择, 也就是说, 算例 b 是算例 a 的一个完全相似模型. 为了便于说明问题, 考虑采油井 1 的产量比采油井 2 的产量大一个量级的情况, 此时, $\pi_{1,p} \gg \pi_{2,p}$. 现讨论采油井无量纲产量对油藏中压力分布过程的影响, 即以压力为目标函数, 分析压力对无量纲量 π_1, π_2 的敏感性. 为此, 根据 (3) 式定义 (x_i, y_i) 点处压力的敏感因子为

$$s_{ijk} = \left| \frac{(p_{ij,m} - p_{ij,p})/p_{ij,p}}{(\pi_{k,m} - \pi_{k,p})/\pi_{k,p}} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, n_x; j = 1, 2, \dots, n_y; k = 1, 2, \quad (7)$$

其中 n_x, n_y 为 x, y 方向的网格数.

为讨论压力空间分布的变化, 对 s_{ijk} 进行空间平均得到敏感因子 s_k ,

$$s_k = \frac{\frac{1}{n_x n_y} \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^{n_x} |(p_{ij,m} - p_{ij,p})/p_{ij,p}|}{|(\pi_{k,m} - \pi_{k,p})/\pi_{k,p}|}, \quad k = 1, 2, \quad (8)$$

上式中, 分子表示模型与原型压力空间分布的平均

相对误差, 分母表示模型无量纲量偏离原型的程度.

以算例 b 为例, 当模型 (即算例 b) 的无量纲量 $\pi_{k,m}$ 与原型 (算例 a) 值 $\pi_{k,p}$ 有微小偏离 (取 $|(\pi_{k,m} - \pi_{k,p})/\pi_{k,p}| = 1\%$) 时, 我们得到压力分布的敏感因子 $s_1 = 0.69, s_2 = 0.024$. 可见, $s_1 \gg s_2$, 这说明, 油藏中的压力分布更敏感地依赖于采油井 1 的无量纲产量, 在进行模型设计时, 必须保证与采油井 1 的产量相关的无量纲量 π_1 与原型完全一致, 在此前提下, 即使与采油井 2 的产量相关的无量纲量 π_2 与原型有一定偏离, 也不至于导致模型压力分布与原型太大的偏差. 至此, 我们从数值敏感性分析的角度, 得到了与 2.1 节理论分析完全一致的结论.

2.4 局部相似的误差分析

还可以从另外一个角度来解释这种敏感性分析所反映的真实物理含义. 如前所述, (8) 式的分子表示模型与原型压力空间分布的平均相对误差, 这里我们用 E 来表示, 即

$$E = \frac{1}{n_x n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} |(p_{ij,m} - p_{ij,p})/p_{ij,p}|, \quad (9)$$

显然, 如果 $\pi_{1,m} = \pi_{1,p}$, 且 $\pi_{2,m} = \pi_{2,p}$, 则 $E=0$, 即模型中压力分布与原型完全相似. 现考虑模型与原

型近似相似的情形, 此时, 模型的压力分布只能近似反映原型的情况, $E > 0$.

仍以算例 a, b 分别为原型和模型的情况为例, 来讨论两无量纲量对压力分布的平均相对误差 E 的影响, 为此, 定义无量纲量的偏离系数, $C = \pi_m / \pi_p$, 如果二无量纲量之一保持与原型一致, 另一个允许有一定偏离, 则压力分布的平均相对误差 E 随偏离系数 C 的变化情况如图 4 所示. 显然, 图 4

(a), (b) 中的 $E-C$ 关系分别反映了无量纲量 π_2 和 π_1 与其原型值的偏离对压力分布的影响. 易见, 压力分布的平均相对误差 E 显著地依赖于 π_1 偏离原型的程度, 而对 π_2 偏离原型的程度相对地不敏感. 如果仅考虑将平均相对误差 E 控制在 5% 以内, 那么当 $\pi_{1,m} = \pi_{1,p}$ 时, π_2 可以偏离原型多达 2.8 倍. 这再一次从数值分析的角度证明了 2.1 节理论分析的结论.

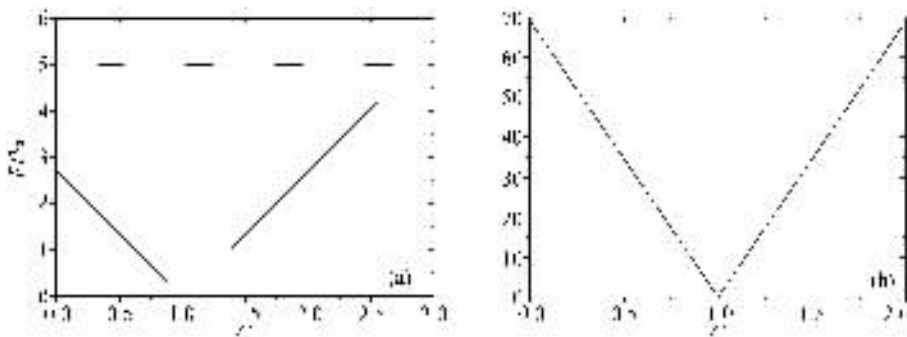


图 4 压力分布的平均相对误差 E 随模型无量纲量偏离原型程度的变化

(a) $\pi_{1,m} = \pi_{1,p}$, $\pi_{2,m} = C\pi_{2,p}$; (b) $\pi_{1,m} = C\pi_{1,p}$, $\pi_{2,m} = \pi_{2,p}$

从以上分析可见, 本文提出的数值方法不仅可以获得复杂流动问题的主要相似准则, 而且还可以确定在近似相似的前提下, 次要相似准数可以偏离原型的程度.

2.5 流动参数对目标函数敏感性的影响

实际的复杂流动不仅涉及众多参数, 而且各参数变化的范围很大, 如: 油藏多孔介质渗流中, 原油的粘性可以从 1—10000 mPa·s、而渗透系数可以低到 1 mD, 也可以高达 1D. 从第 1 节的分析, 我们知道, 流动参数的改变可能影响目标函数的敏感性, 甚至使控制流动的无量纲量的主次关系发生变化.

为了进一步说明流动参数的影响, 我们设计了不同的原型油藏和相应的模型, 以进行比较分析. 表 2 列出了设计油藏渗流运动的两个无量纲量的值, 算例 1—11 的总压缩系数、孔隙度、几何尺寸、边界条件、采油井产量以及无量纲渗流时间 t_D 等流动参数均相同, 且各算例的两个无量纲量的比值亦保持不变 ($\pi_1/\pi_2 = 10$), 仅渗透系数或原油粘度、流动的时间尺度 ($T=L^2/\chi$) 不同. 表 2 中算例 1 即表 1 中的算例 a, 其渗透系数为 1D、原油粘性为 2 mPa·s, 以此为参照, 减小渗透系数或增大原油粘性便可以得到表 2 中的其他算例, 如: 算例 6

表 2 不同参数的算例及敏感因子

算例	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
π_1	1	2	4	6	8	10	15	20	100	1000	10000
π_2	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	10	100	1000
T/s	1000	2000	4000	6000	8000	10000	15000	20000	1×10^5	1×10^6	1×10^7
s_1	0.69	2.11	5.39	8.09	5.66	5.27	2.55	1.47	0.96	0.89	0.88
s_2	0.024	0.089	0.35	1.07	1.13	1.05	0.46	0.24	0.14	0.12	0.12
s_1/s_2	28.70	23.70	15.40	7.56	5.01	5.02	5.54	6.12	6.86	7.42	7.33

代表了渗透系数为 0.1 D、原油粘性为 2 mPa·s (或渗透系数为 1D、原油粘性为 20 mPa·s) 的渗流运动; 而算例 11 代表了渗透系数为 0.0001 D、原油粘性为 2 mPa·s (或渗透系数为 1D、原油粘性为 20000 mPa·s) 的渗流运动. 因此, 与算例 1 比较, 算例 11 代表一种稠油或低渗油藏.

现仍以油藏中压力空间分布为目标, 对各算例进行类似于算例 a 的数值敏感性分析, 得到不同流动参数时, 油藏压力分布的敏感因子如表 2, 两个敏感因子随无量纲量取值的变化关系如图 5. 可见, 油藏性质或者说流动参数 (此处主要指渗透系数和原油粘性) 对压力分布敏感因子的影响是显著的. 由于无量纲量 π_1, π_2 之比不变, 因此根据敏感因子来判断, 它们对压力分布影响的主次关系也没有变化, 即 π_1 对压力分布的影响起主导作用. 但是, 两敏感因子的比值 s_1/s_2 随无量纲量的值而变化 (如图 6), 图 6 表明两者之主次程度对无量纲量值的依赖是明显

的. 因此, 不同参数的油藏模型可以对次要无量纲量放松的程度是不同的. 对于稠油和低渗油藏, 原油越粘稠或渗透率越低, s_1/s_2 越小, 模型对次要准数 π_2 的相似要求越严格, 而此时因渗流量较小, 相同的采油井产量误差 (绝对误差) 会导致较大的压力误差, 或者说在相同的实验条件下, 模拟的采油井产量与现场产量的偏离较大. 反之, 对于稀油和高渗油藏, s_1/s_2 较大, 模型对 π_2 的相似要求相对较松, 且因此时渗流量较大, 模拟的采油井产量精度较高.

对于涉及众多参数的更复杂情形, 某一流动参数往往出现在多个无量纲量中, 则该参数的改变不仅会导致无量纲量主次程度的变化, 而且更为重要的是, 可能导致无量纲量主次关系的改变, 即次要相似准数变为主要者, 或主要相似准数变为次要者.

3 结论

复杂流动涉及众多的参数和无量纲量, 其完全相似模型往往是不可能实现的. 解决这类问题的方法只能是寻找主要的相似准则, 以设计局部相似模型. 本文提出一种数值优化方法, 对选定的目标函数进行数值敏感性分析, 从而确定影响目标函数的主要相似参数. 讨论了该方法有关敏感因子的定义、其与无量纲量的依赖关系、以及基于无量纲方程的数学模型进行敏感性分析的必要性等关键问题. 将该方法应用于油藏多孔介质渗流, 得到了与理论分析一致的相似准则, 证明该方法不仅便于确定复杂流动的主要相似准则, 而且可以界定在保证所关心的目标函数近似相似的前提下, 次要相似准数可以被放松的程度. 进一步研究表明, 物理参数对敏感因子的影响明显, 不同参数条件下, 流动相似准数的主次程度不同, 在某一工况下的主要相似参数, 在另一种工况下可能变为次要者, 反之亦然.

参 考 文 献

- 1 Gel'fand B E, Takayama K. Similarity criteria for underwater explosions. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2004, 40 (2): 214—218
- 2 Bociaga E, Sikora R. Criteria of similarity of plastics flow in cold mold channels. *Polimery*, 2004, 49(1): 36—41
- 3 Mackinnon R J, Schimmel K A, Loehr C A, et al. Scaling *in situ* bioremediation problems by application of multiphase, multicomponent transport theory. *Chemical Engineering Com-*

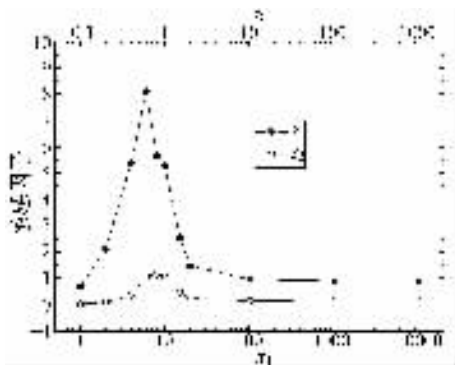


图 5 目标函数对无量纲量的敏感因子与无量纲量的关系

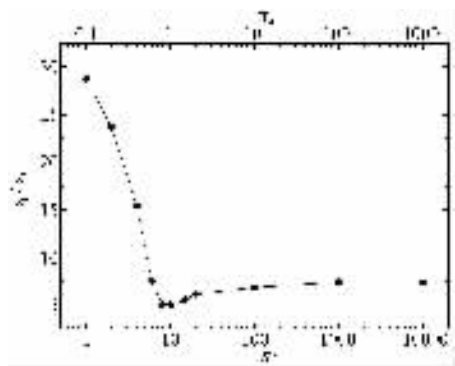


图 6 敏感因子 s_1 与 s_2 之比与无量纲量的关系

- munications, 1997, 158: 123—156
- 4 Sedov L I. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. London: Infosearch Ltd, 1959
 - 5 沈平平, 俞稼镛. 大幅度提高石油采收率的基础研究. 北京: 石油工业出版社, 2001
 - 6 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
 - 7 郑哲敏, 谈庆明. 相似理论与模化. 郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004, 777—808
 - 8 谢鉴衡. 河流模拟. 北京: 水利电力出版社, 1990
 - 9 Taylor G I. The formation of a blast wave by a very intense explosion. I. Theoretical discussion. Proc Roy Soc, 1950, A 201: 159—174
 - 10 郑哲敏. 郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004
 - 11 Doan Q, Ali S M F, George A E. Scaling criteria and model experiments for horizontal wells. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1992, 31(9): 57—65
 - 12 彭克镛, 丁海军, 姚恒申. 聚合物驱油物理模拟的相似准则. 石油学报, 1993, 14(3): 84—92

国家自然科学基金项目资助类型介绍: 重大项目

重大项目主要用于支持科学发展中具有战略意义, 我国具有优势, 可望取得重大突破, 达到或接近国际先进水平的前沿性基础研究; 支持国家经济发展亟待解决的重大科学问题, 对开拓发展高新技术产业具有重要影响或有重大应用前景的基础研究; 支持围绕国家可持续发展战略目标或为国家宏观决策提供依据的重要基础性研究, 以及具有广泛深远影响的科学数据积累等基础性工作; 支持自然科学基金面上、重点项目多年资助基础上凝练出来的、需加大资助力度, 即可望取得重大突破的重大科学问题研究。

重大项目主要瞄准国家目标, 把握世界科学前沿, 根据国家经济、社会、科技发展的需要, 重点选择具有战略意义的重大科学问题, 组织学科交叉研究和多学科综合研究, 进一步提升源头创新能力. 重大项目采取统一规划、分批立项的方式, 自然科学基金委各科学部根据国家基础研究发展战略和自然科学基金委优先资助领域, 在深入研讨和广泛征求科学家意见的基础上, 征询科学部专家咨询委员会的意见, 提出重大项目立项领域建议. 跨科学部重大项目的立项领域建议应由两个以上(含两个)科学部联合提出. 这些研究领域建议按照规定程序差额遴选, 最终由自然科学基金委委务会议审定批准立项.

自然科学基金委不定期发布《重大项目申请指南》, 引导研究人员进行项目申请.

重大项目目前的资助强度一般在每项 800 万元左右, 资助期限为 4—5 年.