

# 油藏

(美) 哈利德·阿齐兹 著  
(加) 安东尼·塞特瑞 著  
袁士义 王家禄 译

# 数值模拟

Petroleum reservoir simulation

$$-\nabla \cdot \rho \vec{u} = \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) \right] + \tilde{q}$$

石油工业出版社

# 油藏数值模拟

[美]哈利德·阿齐兹  
[加]安东尼·塞特瑞 著  
袁士义 王家禄 译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书系统阐述了油藏数值模拟原理、数学模型及数值模型的建立、方程系统及线性方程组的数值求解方法等基础知识,并提供了相关的练习题。可作为有关大专院校师生和油藏数值模拟工程师的教学、研究参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

油藏数值模拟/(美)阿齐兹(Aziz, K.), (加)塞特瑞(Settari, A.)著;  
袁士义,王家禄译.

北京:石油工业出版社,2004.3

书名原文:Petroleum Reservoir Simulation

ISBN 7-5021-4699-7

I. 油…

II. ①阿…②塞…③袁…④王…

III. 油气藏-数值模拟

IV. P618.130.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 054910 号

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without the prior written permission of the publisher.

本书经阿齐兹(Aziz, K.)和塞特瑞(Settari, A.)授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

版权(2003)合字-0156

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004年3月第1版 2004年3月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:20

字数:502千字 印数:1-2000册

定价:60.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

## 译 者 序

油藏数值模拟是油田开发方案和调整方案编制、动态预测等油藏管理的重要技术手段和基本工具,在现代油藏开发管理中发挥着越来越重要的作用。这本《油藏数值模拟》专著最早出版于1979年,之后以英文、俄文的形式多次再版,已成为该方面的经典之作。

该书系统阐述了油藏数值模拟原理、数学模型及数值模型的建立、方程系统及线性方程组的数值求解方法等基础知识。尽管近年来由于计算机的快速发展,油藏数值模拟技术,特别是计算方法、程序设计及计算结果的图形处理等方面都取得了长足的进步,但正如作者在该书最近再版时指出的那样,油藏数值模拟的基本原理和基本方法仍是相同的。这本书对于进行该方面的学习和研究提供了非常好的基础。

经作者同意,我们将该书最新版译为中文版,以便我国有关大专院校师生和油藏数值模拟工程师教学、研究参考。相信该书中译本的出版,将对我国油藏数值模拟技术的发展和油田开发水平的提高起到积极地促进作用。

衷心感谢作者对此中译本提供的支持和帮助。

译 者  
2004年3月

**向玛莎瑞特和芭芭拉致谢**

## 致 谢

本书写作、出版过程中得到了许多个人和研究机构的帮助,在此作者向他们深表谢意,特别是:

B. Agbi, A. Spivak 和 J. W. Watts 检查书稿。

S. C. M. Ko(提供了他研究工作中未发表的一些结果), J. Abou - Kassem, J. W. Grabowski, R. Mehra, B. Rubin 和其他同学及同事多年来对该书不同章节和书稿的建议。

Pat Hitchner, Brenda Oberhammer 和 Betty Lewis 仔细输入各种书稿版本,并在其他方面提供了很多帮助。

国家研究委员会(加拿大),能源、矿产和资源部(加拿大),卡尔加里大学化学工程系、计算机模拟小组对本项工作都有直接或间接的支持。

卡尔加里大学给 K. Aziz 的 Killam 居民奖使得这项工作能够顺利完成。

通信资源发展和工程公司允许 A. Settari 进行这项工作并提供了良好的工作环境。

K. H. Coats 和该领域其他研究人员,包括许多内部职员,从他们的经验中我们受益匪浅。

石油工程学会、Pergamon 出版社、工业协会和应用数学协会允许我们复制他们已发表的材料。

卡尔加里大学 Marilyn Croot 帮助画图, Natasha Aziz 和 Imraan Aziz 帮助整理并复印材料。

应用科学出版社的编辑也对该稿投入了很大的关注。

# 前 言

本书是为理论研究工程师,特别是那些想知道怎样建立和使用油藏计算模型的实用数学家和科学家而写的。

尽管这本书大部分写的是如何运用数值方法去解偏微分方程,但它却不是一本数值分析方面的书。有几本关于偏微分数值解的书,它们处理的方程没有油藏多相流动方程。油藏数值模拟方程有工程师或科学家必须考虑的特征,因为油藏数值模拟中工程、物理和数学相互制约,所以建立较好的模型之前,必须很好地理解这三方面的关系。

这本书适合于工程师们的短期教程,也适合于自学。希望本书能为致力于发展和应用数值模拟技术的科学家和工程师们提供参考。这里的一些观点可直接应用于地下水运动的数值模拟。

实践中我们发现,通过编写和测试计算机程序得到的对模拟理论的理解,是其他方式无法替代的。因此建议在油藏数值模拟的各种课程中,读者应该编写一些模拟程序,如简单的一维单相流模型(第3章)、一维两相流模型(第5章)和二维单相流模型(第7章)。建立这些模型所需的一些基本子程序附在附录B中。

本书中,我们尽可能地把每一概念用最简单的语言进行解释,并且生动而不抽象。本书中也提供了对一些数值分析基本概念的简单讨论。读者如果想知道得更详细,请参阅相关的文献。有关油藏模拟的内容,在讨论各种油藏模拟的理论和实际应用的整个过程中我们试图建立相同的符号和术语。我们不想追求领先,因为许多观点是由几个人同时提出来的,而且有些结果是由于竞争原因还不能公开。

这本书包含了对黑油油藏有限差分模型完整的数值处理,不包含其他开采过程的数值模拟,如热采、化学驱、混相驱(除了第12章简单的数值模拟)和模拟方法中变分法的应用。这样做的目的是因为要使本书篇幅合理,还因为这些领域正在迅速发展。

Khalid Aziz  
Antonin Settari

## 本版前言

尽管这本书我们最早出版于 1979 年,但大部分工作完成于 25 年前。经过 5 次再版和几个出版社(应用科学出版社, Elsevier 应用科学出版社和 Chapman&Hall 出版社)之后,该书 1996 年还是脱销了。自从那以后,我们非正式地给我们的学生和同事一些复印本。

从第一版之后,有很多东西已经发生了变化,但所有建立模拟模型的基本概念仍保持不变。由于我们集中于基础工作,所以这本书与它初次出版时一样有价值。尽管需要一本反映最新进展的新书,但石油工程的学生和工程师仍然需要这本书。我们很高兴能够再次出版该书。

Khalid Aziz  
Antonin Settari  
2002 年 3 月



## 中文版前言

本书最早出版于 1979 年,作为对使用计算机进行油藏数值模拟感兴趣的工程师和研究人员的参考书。本书除了在讲英语的国家广泛接受以外,1983 年还翻译成了俄文正式出版。

自从本书首次出版以来,油藏数值模拟已经成为油藏管理的一种基本工具。尽管在许多方面已有显著进展,但油藏模拟的基础没有改变。第一版的主要目的是清楚地给出描述油藏多相流动的基本方程和求解这些方程的方法。这本书的绝大多数内容仍是 1979 年出版的内容。

我们很高兴地支持本书中译本的正式出版。我们希望该书的出版有助于加强北美和中国的油藏数值模拟工程师之间的合作。

Khalid Aziz(石油工程教授, Otton. Miller 地球科学教授)

斯坦福大学

美国,加利福尼亚,斯坦福

Antonin Settari(泛加石油协会主席)

卡尔加里大学化学和石油工程系

加拿大,阿尔伯达,卡尔加里

2003 年 10 月

# 目 录

符号表	(1)
第 1 章 绪论	(7)
1.1 什么是计算模型	(7)
1.2 其他模型	(7)
1.3 计算模型可以回答什么问题	(8)
1.4 小结	(8)
第 2 章 流体流动方程	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 质量守恒定律	(9)
2.3 达西定律	(12)
2.4 基本流动方程	(14)
2.5 不同形式的多相流方程	(17)
2.6 包含非达西效应的流动方程	(21)
2.7 流体和岩石物性	(23)
2.8 小结	(29)
练习题	(29)
第 3 章 一维单相流动	(32)
3.1 引言	(32)
3.2 有限差分近似	(33)
3.3 其他选择的方法	(43)
3.4 网格系统和边界条件	(48)
3.5 直角坐标系中一维流动方程的差分	(52)
3.6 圆柱流坐标系中一维流动方程的离散化	(58)
3.7 有限差分方程组的某些特性	(63)
3.8 小结	(71)
练习题	(71)
第 4 章 三对角矩阵方程组的求解	(76)
4.1 引言	(76)
4.2 求解方法	(77)
练习题	(82)
第 5 章 一维多相流动	(85)
5.1 引言	(85)
5.2 联立求解方法(SS)	(85)
5.3 隐式压力—显式饱和度解法(IMPES 方法)	(91)
5.4 SS 和 IMPES 解法分析	(93)

5.5 非线性处理 .....	(101)
5.6 顺序求解方法(SEQ) .....	(113)
5.7 产量项的处理 .....	(121)
练习题.....	(127)
<b>第6章 块状三对角方程组的解法</b> .....	(132)
6.1 引言 .....	(132)
6.2 求解方法 .....	(133)
<b>第7章 二维单相流动</b> .....	(135)
7.1 引言 .....	(135)
7.2 二维问题分类 .....	(135)
7.3 流动方程的离散 .....	(138)
7.4 边界条件 .....	(141)
7.5 初始条件 .....	(144)
7.6 非线性问题的处理 .....	(144)
7.7 井的处理 .....	(144)
7.8 矩阵形式的方程组 .....	(148)
7.9 二维问题的特殊解法 .....	(149)
7.10 建立网格方法.....	(153)
7.11 小结.....	(157)
练习题.....	(157)
<b>第8章 五对角矩阵方程的解法</b> .....	(159)
8.1 引言 .....	(159)
8.2 直接解法 .....	(163)
8.3 迭代解法 .....	(171)
8.4 迭代解法和直接解法的比较 .....	(193)
8.5 小结 .....	(195)
练习题.....	(195)
<b>第9章 二维多相流动</b> .....	(199)
9.1 引言 .....	(199)
9.2 二维问题分类 .....	(199)
9.3 求解方法及其比较 .....	(201)
9.4 边界条件 .....	(207)
9.5 初始条件 .....	(211)
9.6 水体的模拟 .....	(212)
9.7 平面和剖面问题的模拟 .....	(214)
9.8 单井问题模拟 .....	(219)
9.9 小结 .....	(225)
练习题.....	(225)
<b>第10章 块状五对角方程组的解法</b> .....	(227)
10.1 引言.....	(227)

10.2	直接解法	(228)
10.3	迭代解法	(228)
10.4	迭代解法与直接解法的比较	(230)
10.5	小结	(230)
	练习题	(230)
<b>第 11 章</b>	<b>三维问题及求解技术</b>	<b>(232)</b>
11.1	引言	(232)
11.2	单相流	(232)
11.3	多相流	(240)
11.4	小结	(242)
	练习题	(242)
<b>第 12 章</b>	<b>特殊问题</b>	<b>(244)</b>
12.1	引言	(244)
12.2	拟函数	(244)
12.3	流管及其相关模型	(248)
12.4	变泡点问题的模拟	(248)
12.5	黑油模型不能描述的系统模拟	(251)
12.6	随时间变化的饱和度函数	(254)
12.7	天然裂缝油藏的模拟	(258)
12.8	自动时间步长控制	(258)
12.9	小结	(259)
	练习题	(260)
<b>第 13 章</b>	<b>模型软件的研制及应用</b>	<b>(261)</b>
13.1	软件研制	(261)
13.2	软件应用	(265)
13.3	小结	(269)
<b>附录 A</b>	<b>矩阵代数复习</b>	<b>(270)</b>
<b>附录 B</b>	<b>计算机程序选择</b>	<b>(277)</b>
	参考文献	(288)
	单位换算表	(304)

# 符 号 表

$A$	网格块截面面积
$B_l$	由方程(2.8~2.10)定义的地层体积系数
$b_l = 1/B_l$	地层体积系数的倒数
$C$	任意常数
$C$	浓度,第12章
$c$	累积系数
$c_f$	流体压缩系数,方程(2.37)
$c_R$	岩石压缩系数,方程(2.41)
$E_n = \max_i  e_i^n $	误差范数
$e_i = U_i - u_i$	点 <i>i</i> 处近似解的误差
$F_w$	$p_c(S_w)$ 的反函数
$f$	任意函数
$f_n = \lambda_n / (\lambda_w + \lambda_n)$	非润湿相的分流系数
$f_w = \lambda_w / (\lambda_w + \lambda_n)$	润湿相的分流系数
$g$	重力加速度
$\mathbf{g}$	重力向量
$g_c$	换算常数, $= 32.2 \text{ lb}_m / \text{lb}_f \cdot \text{ft} / \text{s}^2$
$h$	网格间距,第3章
$h$	油藏厚度,第12章
$h$	标高(向下为正方向)
$K_i$	组分 <i>i</i> 的蒸汽相—液相平衡系数( <i>K</i> 值)
$k, k_{x,y,z}$	渗透率,或者渗透率张量的分量
$k_{rl}$	<i>l</i> 相的相对渗透率
$k_{rog}$	油—气系统中油相的相对渗透率
$k_{row}$	油—水系统中油相的相对渗透率
$L$	长度
$M$	相对分子质量,第2章
$M$	网格系统的节点数,第3章
$M = \lambda_w / \lambda_n$	流度比
$M = \mu_o / \mu_s$	混相流动的流度比,第12章
$m = \rho\phi$	单位体积内的质量
$m$	质量通量(单位时间单位面积流过的质量)
$N$	引入边界条件消去未知数后,有限差分格式中的未知数个数

$p_c$	毛细管压力
$p_{\infty}$	多孔介质外面的毛细管压力值
$p_{\text{cog}}$	油—气毛细管压力
$p_{\text{cow}}$	油—水毛细管压力
$PI$	影响函数, 方程(9.52)
$p$	压力( $U, u$ 也表示压力)
$p_b$	泡点压力
$p_l$	$l$ 相压力
$p_s$	饱和压力
$p^w$	井筒压力
$p_{\text{wf}}$	井底流压
$QI$	影响函数, 方程(9.51)
$Q'_{lp} = \frac{\partial Q_l}{\partial p}$	对压力的流量导数
$Q'_{lm} = \frac{\partial Q_l}{\partial S_m}$	对饱和度的流量导数
$Q_{\text{TL}}$	液体总流量
$Q_{\text{To}}$	油相总流量
$Q_{\text{TT}}$	流体总流量
$q$	汇项(单位时间产量); 注入井 $q$ 为负
$\bar{q}$	单位时间单位体积的质量减少量, 生产井为正, 注入井为负
$q_i$	网格块 $i$ 中 $q$ 的近似平均值
$q_l = \bar{q}_l / \rho_{l\text{STC}}$	单位时间单位油藏体积产出的地面标准状态下 $l$ 组分的体积
$R$	通用气体常数
$R(A^v)$	$v$ 次迭代时的平均收敛速度
$R_i$	点 $i$ 处局部离散误差
$R_s$	溶解气油比
$r$	空间坐标(径向上的距离)
$r_e$	外半径
$r_w$	井筒半径
$S_l$	$l$ 相饱和度
$S_{\text{gc}}$	临界气体饱和度或残余气体饱和度, 取决于驱替方向
$S_{\text{gc}}$	液体驱替时的残余气体饱和度, 第 12 章
$S_{\text{gcr}}$	临界气体饱和度, 第 12 章
$S_{\text{gmax}}$	气相的最大饱和度
$S_{\text{nc}}$	排驱过程中非润湿相临界饱和度或渗吸过程中残余饱和度
$S_{\text{wc}}$	渗吸过程中润湿相临界饱和度或排驱替过程的残余饱和度
$S_{\text{wmax}}$	水相的最大饱和度

$S_{wo}$	与 $p_{\infty}$ 相对应的 $S_w$ 值
$T$	温度, 第 2 章
$T = (\lambda A / \Delta x)$	有限差分传导率
$T_l = (\lambda_l) \frac{A}{\Delta x}$	$l$ 相有限差分传导率
$t$	时间
$\Delta t$	时间增量
$U$	因变量(偏微分方程的精确解)
$u$	表观速度或达西速度
$u_i$	网格点 $i$ 处 $U$ 的近似解(对偏微分方程采用某种近似方法得到的代数方程精确解)
$u_T$	总流速, 两相流中为 $u_w + u_n$
$V$	体积
$WI$	生产系数(与采油指数成正比)
$x$	距离
$x_i$	网格点 $i$ 处 $x$ 值
$y$	距离
$Z$	压缩系数
$z$	距离
$\alpha = \Delta t / h^2$	系数
$\beta$	湍流系数, 方程(2.96)
$\beta = \phi \frac{C_f}{B^o} + \phi^o \frac{C_R}{B}$	时间导数的系数
$\Gamma$	油藏边界
$\gamma = \rho g / g_c$	用压力/距离表示的密度
$\Delta \gamma = \gamma_w - \gamma_n$	密度差
$\lambda = k / (\mu B)$	传导率
$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_w \lambda_n}{\lambda_w + \lambda_n}$	平均流度比
$\lambda_i$	特征值
$\lambda_l = k k_{rl} / (\mu_l B_l)$	$l$ 相的传导率
$\lambda_l = k k_{rl} / u_l$	$l$ 相的流度
$\lambda_{\max}$	特征值的最大模量
$\lambda R = k_r / (\mu B)$	径向传导率
$\lambda_T = k \left( \frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \right)$	总流度
$\lambda X = k_x / (\mu B)$	$x$ 方向传导率
$\lambda Y = k_y / (\mu B)$	$y$ 方向传导率
$\lambda Z = k_z / (\mu B)$	$z$ 方向传导率
$\mu$	粘度
$\nu$	迭代阶数

$\xi_m$	放大因子, 方程(3.51)
$\rho$	流体密度
$\rho = \ln r$	变换后的径向坐标, 第3章
$\rho(\mathbf{B})$	基质 $\mathbf{B}$ 的谱半径
$\rho_l$	$l$ 相密度
$O$	近似值的阶
$\theta$	角度
$\phi$	孔隙度
$\phi = \int_{p^0}^p \frac{dp}{\gamma} - z$	拟势函数
$\Psi$	拟压力, 方程(2.52)
$\Omega$	油藏边界
$\omega$	混合参数, 第12章
$\omega$	SOR 方法中松弛因子
$\omega_b$	SOR 方法中, $\omega$ 的最优值
$\omega_{li}$	$l$ 相 $i$ 组分的质量分数
$\omega_i$	混合物中 $i$ 组分质量分数

### 运算符

$\mathbf{A}$	代数方程组中的系数矩阵
$A$	直角坐标系的差分算子
$\mathbf{B}$	$\mathbf{u}^n$ 系数矩阵, 方程(3.54)
$\mathbf{C}$	第四种边界值问题的系数矩阵
$C$	柱坐标中差分算子
$\mathbf{D}$	累积项矩阵
$\mathbf{E}$	主对角线上元素为 2, 上下对角线上元素为 -1 的对称三对角线矩阵
$\mathbf{G}$	重力项向量
$\mathbf{I}$	单位矩阵
$\mathbf{J}$	雅可比行列式
$\mathbf{L}$	LU 因式分解的下三角矩阵
$L$	直角坐标系的有限差分算子
$\mathbf{M}$	柱坐标系的有限差分算子
$\mathbf{Q}$	源向量
$\mathbf{S}$	对称三对角矩阵, 第4章
$\mathbf{T}$	传导率矩阵
$\mathbf{U}$	LU 因式分解的上三角矩阵, 第8章
$\Delta$	差分算子
$\Delta^2$	二阶空间导数差分算子
$\Delta_s$	坐标 $s$ 方向上网格间距 ( $s = x, y, z, r$ 等)
$\Delta_t$	时间导数的差分算子



## 下标

dg	溶解气
f	流体
fg	自由气体
i	初始值,第 12 章
$i \pm \frac{1}{2}$	包含点 $i$ 的网格块边界
$i$	网格点 $i$
J	雅可比矩阵
$l$	组分或相, $l = o, g, w$ (油, 气, 水)
N	对应于最后一个未知量的空间网格点的序号
n	非润湿相
RC	油藏条件
R	岩石
$r, \theta, z$	柱坐标系中的三个方向
s	溶剂,第 12 章
sf	砂层面
STC	标准状态或标准条件
T	总量
$w$	润湿相或水相
$x, y, z$	直角坐标系的三个方向

## 上标

$b$	后向差分
$f$	前向差分
L	对数
$n$	时间阶, $n = 1, 2, 3, \dots$
$o$	初始条件( $t = 0$ )或者参考条件
$p$	有限差分近似值的阶
r	参考
T	矩阵或向量转置
2	中心的
*	中间解或扰动解
'	$\frac{d}{dx}$ 或者 $\frac{\partial}{\partial x}$
"	$\frac{d^2}{dx^2}$ 或者 $\frac{\partial^2}{\partial x^2}$
.	$\frac{\partial}{\partial t}$
—	VE 计算按深度平均的拟函数值,第 12 章