

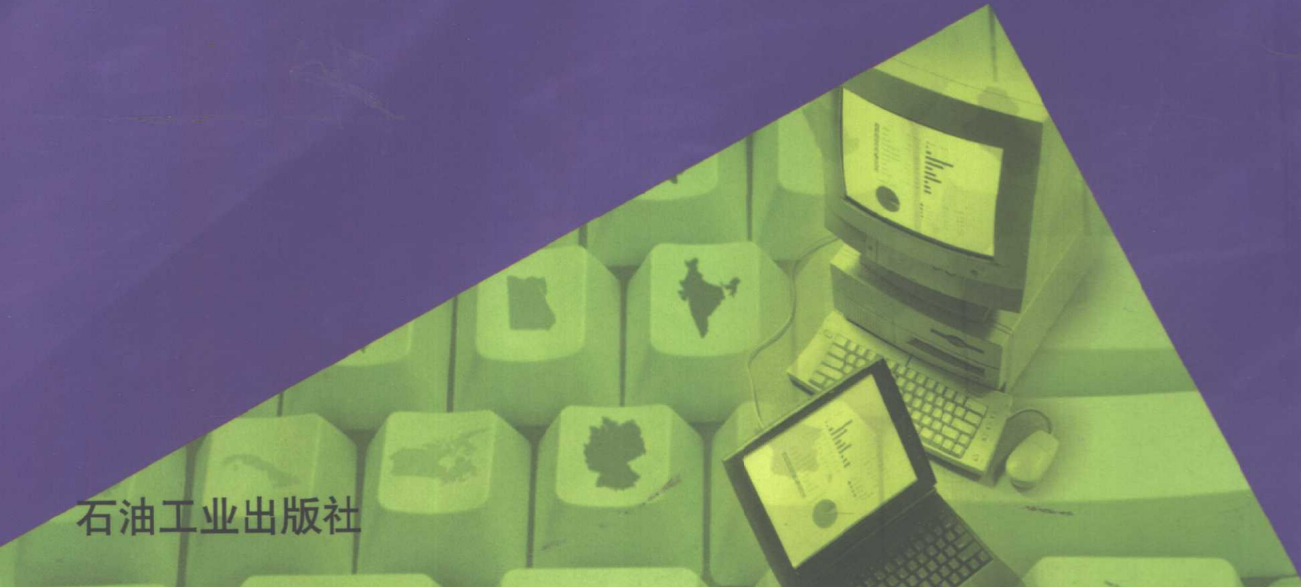
QIANGHUA CAIYOU YOU CANG SHU ZHI

# 强化采油油藏数值 模拟基本方法

MO NI JI BEN FANG FA

朱维耀 鞠岩 著

石油工业出版社



# 强化采油油藏数值模拟 基本方法

朱维耀 鞠岩 著

石油工业出版社

---

## 内 容 提 要

本书是一本有关油藏数值模拟理论及方法的专著。全书共分为十二章，分别系统地阐述了油藏数值模拟的基本数学模型、基本原理、模拟方法、使用技巧等。书中除对基本数学模型叙述外，重点阐述强化采油中对各个模型的运用，介绍了各种模型在油气田开发中应用的实例。

本书适合石油工程技术人员、科学技术工作者及石油院校教师、大学生、研究生阅读。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

强化采油油藏数值模拟基本方法/朱维耀，鞠岩著.

北京：石油工业出版社，2002.6

ISBN 7-5021-3785-8

I. 强…

II. ①朱…②鞠…

III. 油气藏-数值模拟

IV. P618.130.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 035860 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 132 千字 印 1—1500

2002 年 6 月北京第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3785-8/TE·2759

定价：20.00 元

## 序 言

20世纪90年代油藏数值模拟技术的发展，以其多相渗流力学理论的深入、应用范围之拓广、计算机技术的飞跃发展而出现勃勃生机。大型油藏数值模拟集成化软件的不断发展，为石油科技工程技术工作者提供了强有力的应用工具。油藏数值模拟这门高新科学技术，正成为油气田开发、经营与决策过程中不可缺少的武器。

纵观油藏数值模拟技术的发展，使我们倍受鼓舞。它是集油气田渗流力学理论、油气田开发理论、计算数学理论、工程应用技术和计算机软件、硬件技术综合发展于一身的高新技术。世界上大部分油气田均在使用这门技术，并在开发生产中起到了重要的作用。随着计算机技术的普及和油藏数值模拟理论、技术的发展，油藏数值模拟的作用将扩展到更广泛的领地，也必将带来更大的经济效益。

《强化采油油藏数值模拟的研究与应用》一书，是作者多年来在油藏数值模拟的研究与应用方面的积累和总结。书中叙述了油藏模拟中遇到的各种模型，阐述了各类数学模型、模拟基本原理、模拟基本方法、使用技巧。是一本全面、系统阐述油藏数值模拟的专著，相信此书的面世将对石油科技、工程技术人员、广大师生今后的工作和学习起到一定的帮助。

感谢这些作者和编辑为此书出版所作出的贡献。

刘嘉群  
2002年3月

# 前 言

油藏数值模拟是一门多学科多领域的高新技术，它是集油气田开发中的地质、油气藏渗流理论、油藏工程方法、计算数学理论及电子计算机技术为一体的一门新兴学科。近几年来在油气田开发经营与决策中起到了重要的作用。随着油气田开发的深入，有越来越多的复杂问题，离不开油藏数值模拟技术的分析与决策。因此，需要油藏工程师掌握这门技术，从而科学地进行油气田开发的动态分析和正确决策。鉴于我国油藏数值模拟工作起步较晚，加之其涉及知识面较广，大部分人员对该技术的掌握还存在困难，在实际油气田开发应用中存在种种问题，难以达到数值模拟技术应起的效果。帮助石油工程师们更快更好地了解、掌握和运用油藏数值模拟技术，提高应用水平，特写此书奉献给广大读者。

本书在内容上有别于以往关于黑油模型的数值模拟的专门论著。重点阐述各类模拟的数学模型、基本原理、模拟方法、使用技巧和应用实例。有些详细的计算方法、差分方法，这里不再叙述。

全书共分三章，第一章共四节，第一节为油藏模拟概述，第二节阐述了黑油模型的基本数学方法，第三节阐述了裂缝型模型的基本数学方程，第四节叙述了组分模型的基本数学方法。第二章共二节，即第一节和第二节，介绍混相驱和热采驱油模拟，前者为气体混相驱油基本原理，后者阐述了热采模型基本数学方程。第三章共六节，阐述化学驱油数值模拟，即第一、二、三、四、五、六节，第一节对化学驱进行概述，第二节叙述表面活性剂驱油数学模型，第三节阐述交联聚合物/聚合物驱油数学模型，第四节介绍碱水驱油模型，第五节叙述了复合驱油数学模型，第六节阐述微生物驱油数学模型，在每个模型的应用上给出了算例。

目前已出版的油藏数值模拟类图书较少，大部分是对黑油模型的描述，因此希望本书能为石油科技、工程技术人员、大专院校师生在油藏数值模拟的学习和应用中起到积极的作用。

由于时间仓促及作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2002年3月

# 目 录

第一章 油藏模拟基本原理	( 1 )
第一节 油藏模拟概述	( 1 )
一、油藏模拟综述	( 1 )
二、模型选择	( 4 )
第二节 黑油模型基本数学方程	( 5 )
一、基本假设	( 5 )
二、数学基本方程	( 5 )
三、连续性方程	( 7 )
四、流体和岩石性质	( 7 )
五、计算方法	( 9 )
六、算 例	( 9 )
第三节 裂缝型模型基本数学方程	( 12 )
一、基本假设	( 12 )
二、数学基本方程	( 13 )
三、算 例	( 15 )
第四节 组分模型基本数学方程	( 26 )
一、基本假设	( 26 )
二、数学基本方程	( 26 )
三、算 例	( 28 )
第二章 气体混相驱油基本原理	( 33 )
第一节 气体混相驱油性质	( 33 )
一、二氧化碳—原油的性质	( 33 )
二、混相气体驱油机理	( 33 )
三、二氧化碳驱提高采收率	( 34 )
四、气体混相驱油数学模型	( 35 )
第二节 热采模型基本数学方程	( 35 )
一、基本守恒方程	( 35 )

二、流体组分特性·····	( 38 )
三、算 例·····	( 39 )
<b>第三章 化学驱油油藏数值模拟基本原理和方法·····</b>	<b>( 53 )</b>
<b>第一节 化学驱油概述·····</b>	<b>( 53 )</b>
一、化学驱油机理·····	( 53 )
二、化学驱油驱替过程·····	( 54 )
三、化学驱油的适用条件·····	( 56 )
四、化学驱油渗流数学描述·····	( 56 )
<b>第二节 表面活性剂驱油数学模型·····</b>	<b>( 57 )</b>
一、表面活性剂驱油渗流数学模型·····	( 57 )
二、模型的求解方法·····	( 67 )
三、表面活性剂驱油数学模型的应用·····	( 72 )
四、算 例·····	( 72 )
<b>第三节 交联聚合物防窜/聚合物驱油数学模型·····</b>	<b>( 77 )</b>
一、交联聚合物防窜/聚合物驱油渗流数学模型·····	( 77 )
二、算 例·····	( 80 )
<b>第四节 碱水驱油数学模型·····</b>	<b>( 91 )</b>
一、碱水驱油渗流数学模型·····	( 91 )
二、模拟计算描述·····	( 95 )
三、算 例·····	( 96 )
<b>第五节 复合驱数学模型·····</b>	<b>( 99 )</b>
一、碱/表面活性剂/聚合物驱油方法·····	( 99 )
二、复合驱油渗流数学模型·····	( 100 )
<b>第六节 微生物水驱传输组分模型模拟器·····</b>	<b>( 102 )</b>
一、微生物水驱传输组分模型·····	( 102 )
二、算 例·····	( 105 )
<b>参考文献·····</b>	<b>( 111 )</b>

# 第一章 油藏模拟基本原理

## 第一节 油藏模拟概述

### 一、油藏模拟综述

#### (一) 油藏数值模拟的发展

油藏数值模拟始于 20 世纪 50 年代，是随油藏工程渗流理论、计算数学理论和电子计算机技术的发展而形成的一门新兴学科。由于油田开发基础理论的发展和计算机的广泛应用，使油藏数值模拟技术的应用成为可能。经验证明，油藏数值模拟方法为油气田开发及油藏工程的研究提供了现代化的手段，成为油藏工程技术人员的一种必不可少的工具。

油藏数值模拟经历了起源、发展、成熟的几个阶段。早在 1936 年，Schilthuis 推导了“物质平衡方程”，即零维模型，1937 年 Muskat 发表了“均质流体通过多孔介质的流动”，1942 年 Buckley 和 Leverett 发表了“前缘推进理论”，1949 年 Van Everdingen 和 Hurst 发表了“拉普拉斯变换对油藏问题的应用”。这些论文的发表，初步建立了油藏工程的理论基础，并开始应用于油田的开发实践。

1953 年 Peaceman 等人开始用数值方法求解复杂的地下渗流问题，如：“非定常气体渗流的计算”、“抛物型及椭圆型微分方程的数值解”等等。从 1950 年至 1970 年的 20 年间，油藏数值模拟完成了黑油模型的研究，即两相（气、水）和三相（油、气、水）黑油模型。这期间发表了许多论文：对黑油模型研究与应用的主要贡献者有：Coast (1969)、Meculloch (1969)、Weaver (1972)、Dandona 和 Morsse (1975)；对数值方法研究的主要贡献者有：Sheldon、Stone 和 Fagin、MacDonala、Blair 和 Weinaug 等等。在这期间，由于计算机的飞速发展，促进了数值模拟的进展。黑油模型应用于油气田开发评价、方案的筛选、井网、井距、注水、注气、采油速度、钻加密井等对采收率影响的研究。

进入 70 年代后，油藏数值模拟发展较快，出现了混相驱、化学驱、二氧化



碳驱、蒸汽驱、热水驱、火烧油层驱等模拟方法。并考虑解决更为复杂的多组分相态在温度、化学剂的影响下原油的物理化学性质问题，以及考虑化学剂的吸附、降解、乳化和界面张力变化、反应动力学和其他热效应、复杂的相态平衡等等。在实际的模拟和应用中，这些模型和模拟方法得到了检验、调整和进一步的发展。

早在 1965 年 Kniazeff 和 Naville 对易挥发油藏进行了研究，发表了题为“挥发烃两相流”的论文；1973 年 Nolen 对油藏组分模拟进行了研究，发表了“油层中组分现象的模拟”一文。其中组分模型就是描述有  $n$  种碳氢化合物组分的油藏，利用状态方程计算油相和气相的特性参数和平衡参数，计算凝析油藏的采收率以及评价注二氧化碳、注氮气或混相驱等对采收率的影响。

蒸汽驱中的热水驱和火烧油层等热采模型，主要用于模拟重质油的开采，以提高油层温度、降低原油粘度、或使原油蒸馏成气体而提高原油的采收率。对热力开采特别是蒸汽驱开采方面的数值模拟研究的文章发表较多，如 Herrera、Williams 及 Meldau 等分别发表了关于蒸汽驱数值模拟结果与油田实际注蒸汽的动态进行对比的论文。

化学驱模型有聚合物、胶束及碱水驱、交联聚合物、复合驱。聚合物驱主要是降低油水流动度比，降低水相相对渗透率或增加水相的粘度。胶束表面活性剂驱主要是降低油水界面张力。碱水驱主要是乳化增溶、离子交换、润湿性转换、界面张力变化等。化学驱存在着复杂的流体与流体、岩石与流体之间的相互作用关系和物理化学变化，如吸附、流变学、离子反应、多相流度和转换等问题。

到 90 年代，油藏数值模拟向大型化、综合化、自适应化方向发展，如 VIP、Eclipse、WorkBench、Star 等模型，多种功能一体化。

我国油藏数值模拟研究开始于 80 年代，在引进、消化、吸收国外软件的同时，也研制出了自己的各类软件，如黑油模型、双重均质模型、化学驱模型、聚合物驱模型、交联聚合物驱模型、混相驱、微生物驱模型等等。

## (二) 油藏数值模拟方法解题过程

油藏数值模拟方法能够解决大量的用解析法和物理模拟方法难于或不能解决的多因素复杂问题。用数值模拟方法求解各类问题，一般经过下列几个基本过程。

### 1. 建立数学模型

数值模拟的基础是数学模型，而数学模型是一组数学关系式，它能刻画实际油藏系统的数学关系和空间关系。数值模拟的首要任务是建立基本方程式，并建

立相应的边界条件及初始条件，以构成完备的数学方程组，从而正确反映实际油藏物理量间的定量变化关系。

## 2. 建立差分模型

数学模型建立之后，第二步是如何把偏微分方程组转化成代数方程组，也就是把偏微分方程组离散化为代数方程组。进行这种转化的计算方法有：有限差分法、有限元法及变分法。其中差分法是油藏数值模拟中应用最多的一种方法，它是用差分法建立差分模型，即用差商代替微商，将偏微分方程组离散化为差分方程组即代数方程组。

## 3. 差分方程的数值解法

数值解法可分为两类，即直接法和间接法（或迭代法）。直接法是在计算过程中所有的运算都是在精确的前提下，经过有限次运算得到准确解的一类方法，如高斯消去法、主元素消去法、矩阵分解法等。迭代法是从任意选取未知量的某一组初始值出发，经过反复迭代，最后求得线性代数方程组的解，如简单迭代法、赛德尔迭代法和松弛法等。

## 4. 进行程序设计

根据数值模型，在计算机上用相适应的语言编写计算程序，通常使用的程序有 FORTRAN 语言、C 语言和 Basic 语言等。

## 5. 上计算机

编制完软件以后，根据要研究的问题上机进行计算，并对计算结果进行整理、分析，从而达到最终目的。

### （三）油藏模型软件的应用

在进行油藏模拟研究时，许多限定是同模型的选择有关的。决定油藏种类的主要参数是油藏类型、几何形状和维数、资料数据的有效性等等。在给定问题的条件下，判定应选择气模型、黑油模型、组分模型、化学驱模型等等，是解决一维流动问题还是二维、三维流动问题，这样才能有效地模拟所要研究的问题。

### （四）历史拟合和动态预测

在油藏模型和油藏模拟软件以后，首先进行油藏数据的收集和准备，根据油藏特征、孔隙度、含油饱和度、渗透率、厚度的分布划分网格、以及局部加密网格，从而构成数学地质模型。之后进行油藏开发动态数据输入和历史拟合，通过拟合油藏压力、产量、气油比和水油比，进一步分析、认识油藏。经过对生产动态的分析、井况、测井资料、吸水剖面变化的认识及试井分析来调整有关渗透

率、孔隙度、有效厚度、饱和度、PVT 数据和相对渗透率数据，以达到石油储量拟合、压力拟合、含水率拟合和饱和度拟合的目的。

历史拟合完成后，对油藏进行评价、剩余油饱和度分析和开发方案调整，并进行动态预测，以确定最佳开采条件，获得最大的经济效益和采收率。

## 二、模型选择

### (一) 模拟要求

在着手模拟研究工作之前，首先要确定油藏条件是否需要模拟研究，模型应怎样选择，目标确定之后，即可进行数据整理，并分析数据的真伪性，以便精确、合理地模拟和认识油藏。这些数据参数有：

- (1) 油藏的复杂性，如非均质性、各向异性、分层、流变性、断层、底水、边水等；
- (2) 井的分布及其对油藏特征的影响；
- (3) 采油机理、流动相的数目、相态特征等；
- (4) 资料的可靠性及完善程度；
- (5) 经济参数。

根据油藏特征和数据参数，可选用简单实用的模型和模拟方法。

在许多油藏问题中，可用标准的油藏工程方法适当地进行处理，如：

- (1) 物质平衡方法，当油藏中岩石性质和流体相态变化均不大时，经常可得到令人满意的结果。
- (2) Stiles 和 D.Parsons 方法，计算层间没有或很少有窜流情况下两口井之间的垂向波及情况。
- (3) Buckley - Leverett 前缘推进理论，用于水驱和气驱的方案中，分析行列式注水井网的生产情况。
- (4) 概算法，利用一维两相流动理论来研究水驱过程的规律，同时运用概率统计的方法研究油藏渗透率的非均质状况，最后导出非均质油藏水驱开采时各项指标的计算公式，进行计算和预测分析。
- (5) 其他各种预测方法、经验方法和统计方法。

### (二) 模拟器选择

模拟目标和要求确定之后，就是如何选择好模拟器（即模拟软件）：什么类型的模拟器能够回答我们要模拟的问题，哪一个模拟器回答得最好、精度更高。根据研究的目标模型、历史时间、模拟方案、评价目的和计算机计算能力，来确

定最适合的模拟器。在模拟过程中，增加资料的可信度，校正初始地质数学模型，拟合开采历史、预测油藏开采动态。

### (三) 综合研究

油藏模型给定以后，通常模拟结果难以与开采数据完全相符，需要我们重新认识分析油藏的静、动态数据。在地质地震资料认识不清楚的情况下更是如此。如：油藏断层是否存在；边、底水是否活跃；水浸速度如何；初始含油饱和度分布怎样；是否有尖灭；油藏流体性质如何；井底附近条件是否已经变化；出砂、污染情况等等。通过油藏开采历史和开采方式对采油机理的影响，进一步优化调整开发方案，达到最佳开采油气藏的目标。

## 第二节 黑油模型基本数学方程

### 一、基本假设

黑油模型 (Black-oil Model) 是一个三维三相模型。流体组分分为水、油、气三个组分或拟四个组分，即水、气、所谓的轻质油、重质油 (即黑油)。用轻、重两个组分近似描述碳氢原油体系的多相流动。所谓轻质那部分油是能溶解于油相的可挥发组分，即气从油中出入，但油不能汽化为气相。流体流动假设存在三相：油、水 and 气。通常情况下水是润湿相，油是中等润湿相，气是非润湿相。假定油和水互不相溶，并且无质量转换和相变，假定气相即不溶于油中也不溶于水中。

### 二、数学基本方程

#### (一) 三相流动达西运动方程

$$\vec{V}_w = - \frac{kk_{rw}}{\mu_w} (\nabla p_w - \gamma_w \nabla Z)$$

$$\vec{V}_o = - \frac{kk_{ro}}{\mu_o} (\nabla p_o - \gamma_o \nabla Z)$$

$$\vec{V}_g = - \frac{kk_{rg}}{\mu_g} (\nabla p_g - \gamma_g \nabla Z)$$

式中  $w, o, g$ ——水、油、气相的下标；

$\vec{V}$ ——渗流速度矢量；

$K$ ——绝对渗透率；  
 $K_r$ ——相对渗透率；  
 $\mu$ ——粘度；  
 $\rho$ ——密度；  
 $Z$ ——垂向坐标；  
 $\gamma$ ——相对密度；  
 $p$ ——压力。

相压力之间联系用毛管压力体现。

油水毛管压力：

$$p_{cw} = p_0 - p_w$$

油气毛管压力：

$$p_{cg} = p_g - p_0$$

相对渗透率和毛管压力是饱和度的函数，可写为：

$$k_{rw} = k_{rw}(S_w)$$

$$k_{rg} = k_{rg}(S_g)$$

$$k_{ro} = k_{ro}(S_0)$$

$$p_{cw} = k_{cw}(S_w)$$

$$p_{cg} = k_{cg}(S_g)$$

$k_{rw}$ 、 $k_{rg}$ 、 $p_{cw}$ 、和  $p_{cg}$  均可由油水和油气两相流动实验数据取得，惟有  $k_{ro}$  需要应用 Stone 公式计算：

$$k_{ro} = \frac{[k_{row}(S_w) + k_{rw}(S_w)] \cdot [k_{rog}(S_g) + k_{rg}(S_g)]}{k_{row}(S_{wir})} - k_{rw}(S_w) - k_{rg}(S_g)$$

式中  $S_{wir}$ ——束缚水饱和度；

$k_{row}$ ——油水两相时油相相对渗透率；

$k_{rog}$ ——油气两相时油相相对渗透率。

## (二) 相中组分

油、气、水三种组分在三相中的存在关系可用表 1-1 表示。

表 1-1 不同组分在各相中的部分密度

组 分	水 相	油 相	气 相
水组分	$\rho_w$		
油组分		$\rho_o^o$	
气组分		$\rho_o^g$	$\rho_g$

$\rho_o^o$ ——油组分在油相中的密度，简称油密度；

$\rho_o^g$ ——气组分在油相中的密度，简称溶解气密度。

油相密度  $\rho_o$  与部分密度的关系：

$$\rho_o = \rho_o^o + \rho_o^g$$

### (三) 产量项

井点产量项可用以下公式表示：

$$q_w = PI \frac{k_{rw} \rho_w}{\mu_w} [p_{BH} - p + \gamma_w (Z_{BH} - Z)]$$

$$q_o^o = PI \frac{k_{ro} \rho_o^o}{\mu_o} [p_{BH} - p + \gamma_o (Z_{BH} - Z)]$$

$$q_o^g = PI \frac{k_{ro} \rho_o^g}{\mu_o} [p_{BH} - p + \gamma_o (Z_{BH} - Z)]$$

$$q_g = PI \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} [p_{BH} - p + \gamma_g (Z_{BH} - Z)]$$

$$PI = \frac{2\pi \cdot k \Delta Z}{\ln \frac{\gamma_e}{\gamma_c}}$$

$$\gamma_e = 0.2 \sqrt{\Delta X \cdot \Delta Y}$$

式中  $p_{BH}$ ——井基准面深度  $Z_{BH}$  上的井底压力，

$\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ ——网格节点  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向步长。

### 三、连续性方程

三组分的连续性方程为：

$$\text{水组分} \quad -\nabla(\rho_w \vec{V}_w) + q_w = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial t}$$

$$\text{油组分} \quad -\nabla(\rho_o^o \vec{V}_o) + q_o^o = \frac{\partial(\phi \rho_o^o S_o)}{\partial t}$$

$$\text{气组分} \quad -\nabla(\rho_o^g \vec{V}_o + \rho_g \vec{V}_g) + q_o^g + q_g = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_o^g S_o + \phi \rho_g S_g)$$

式中  $\phi$ ——在考虑压力  $p_s$  下的孔隙度；

$C$ ——岩石压缩系数。

### 四、流体和岩石性质

水和自由气体的流体性质都比较简单，油和溶解气则要经过计算，相对复杂

些，水的密度为：

$$\rho_w = \frac{\rho_{wSTC}}{b_{wi}} [1 + C_w(p - p_i)]$$

式中  $\rho_{wSTC}$ ——气体的地层体积系数；

$b_{wi}$ ——在原始基准面压力  $P$  下水的地层体积系数；

$C_w$ ——水的压缩系数。

对于自由气体：

$$\rho_g = \frac{\rho_{gSTC}}{B_g}$$

式中  $B_g$ ——气体的地层体积系数。

$$B_g = \frac{P}{ZT} \left[ \frac{Z \cdot T}{P} \right]_{STC}$$

式中  $Z$ ——气体的压缩偏差因子；

$T$ ——绝对温度；

$STC$ ——储罐条件下标。

油和溶解气的密度是：

$$\rho_o^0 = \frac{\rho_{oSTC}}{B_o}$$

$$\rho_o^g = \frac{R_s}{B_o} \times \rho_{gSTC}$$

式中  $\rho_{oSTC}$ ——储罐条件下油密度；

$B_o$ ——油的地层体积系数；

$\rho_{gSTC}$ ——储罐条件下气密度；

$R_s$ ——溶解油气比。

由此看出，油和溶解气的性质与油相饱和度是密切相关的。

在三相状态下，各相密度是压力的函数有：

$$\rho_o^0 = \rho_o^0(p)$$

$$\rho_o^g = \rho_o^g(p)$$

$$\mu_o = \mu_o(p)$$

因饱和油相的油和溶解气性质都只是饱和度和压力的一个变量函数，则有：

$$B_o = B_{os}(p_s)$$

$$R_s = R_s(p_s)$$

$$\mu_o = \mu_{os}(p_s)$$

对于未饱和两相状态，在油相未饱和的状态下，没有自由气相存在有：

$$\rho_o^o = \rho_o^o(p, p_s)$$

$$\rho_o^g = \rho_o^g(p, p_s)$$

$$\mu_o = \mu_o(p, p_s)$$

因未饱和油相的油和溶解气性质是压力和饱和压力两个变量的函数：

$$B_o = B_{os}(p_s)[1 + C_o(p - p_s)]$$

$$\mu_o = \mu_{os}(p_s)[1 + C_\mu(p - p_s)]$$

式中  $C_o$ ——油的压缩系数；

$C_\mu$ ——油粘度的压缩系数。

如果岩石孔隙体积随压力有显著变化，则有：

$$\phi = \phi_0[1 + C_\phi(p - p_{i0})]$$

式中  $C_\phi$ ——岩石压缩系数；

$\phi$ ——孔隙度；

$\phi_0$ ——在考虑压力  $p_{i0}$  下的孔隙度。

## 五、计算方法

流体方程组给定之后，根据边界条件和初始条件构成封闭系统，进行求解。求解该方程组的方法是先将偏微分方程组离散化，之后作线性化处理，构成线性代数方程组，方程组矩阵（如图 1-1 所示）。

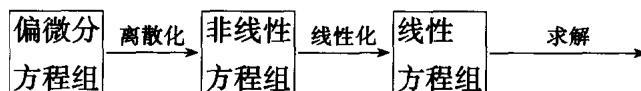


图 1-1 流动方程求解步骤

其线性化处理（计算）方法目前有：IMPES、半隐式、全隐式、SEQ、自适应隐式等等，线性化以后要进行线性方程组的求解，即求解矩阵。

## 六、算例

### （一）开采历史拟合

#### 1. AZ1 区块地质状况

AZ1 区块位于某一油田北部，含油面积  $2.2\text{km}^2$ ，有效厚度  $16.7\text{m}$ ，地质储



量  $244 \times 10^4 \text{t}$ ，标定采收率 25%，可采储量  $61 \times 10^4 \text{t}$ 。

油藏构造形态东南为单斜，东北部具有断层，45-12 与 45-19 以及 45-16 与 45-20 之间具有断层。整个油层系为沙一、二段，油层顶部为生物灰岩，下部为砂岩，含砾砂岩。平均孔隙度 18.9%，渗透率  $305.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度、渗透率底部好于上部。原油地面密度  $0.8798 \text{g/cm}^3$ ，原始地层压力 44.71MPa，地面温度  $116^\circ\text{C}$ ，原始含油饱和度 63%。

## 2. 开发简史

该区域于 1987 年 9 月开始试采，1988 年投入生产并开始注水，1990 年进行过一次整体井网加密调整。目前有生产井 11 口、水井 7 口，属高含水期。

## 3. 数学地质模型建立

根据区块油藏地质状况和初始历史拟合结果，我们将地质模型进行了细划，由原来的单层模型改为两层模型，建立起了相应的三维地质数学模型，从而合理地反映了油藏的纵向、平面的非均质性，其网格节点数为  $27 \times 27 \times 2 = 1472$ 。从而为拟合工作打下了好的基础。

## 4. 区块驱油历史拟合

### (1) 原始地质储量拟合。

区块地质储量  $244 \times 10^4 \text{t}$ ，标定采收率 25%，可采储量  $61 \times 10^4 \text{t}$ 。数值模拟拟合计算到 1995 年 6 月底，计算储量为  $243.9 \times 10^4 \text{t}$ ，采出程度 21.59%，综合含水 91.5%，累计产油  $57.34 \times 10^4 \text{t}$ 。而 45-1 块实际产油  $58.37 \times 10^4 \text{t}$ ，采出程度为 23.92%，综合含水为 93.4%，相对误差小于 5%。

### (2) 压力拟合。

该块原始地层压力 44.71MPa，压力系数 1.3，地层温度  $116^\circ\text{C}$ ，原始含油饱和度 0.63。参阅压力资料，我们对全区压力进行了拟合。

### (3) 含水率拟合。

由于区块非均质性严重，给拟合带来了困难。通过对地质资料及开发动态的深入分析，我们对地质模型进行了深加工，充分考虑到非均质性，根据地质资料，把模型分为两层，同时考虑了断层、边界的影响，从而使含水率达到了较好的拟合，相对误差小于 2%。

## (二) AZ1 区块不稳定注水油藏数值模拟研究

模拟计算结果表明：水驱到 1995 年 6 月底，第一层剩余油分布为 33.61%，第二层剩余油分布为 28.54%。