

油气田开发进修丛书

油藏数值模拟基础

韩大匡 陈钦雷 闫存章 编著

石油工业出版社

京)

油气田开发进修丛书

油藏数值模拟基础

韩大匡 陈钦雷 闫存章 编著

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书系统地论述了油藏数值模拟的原理、方法和实际应用中所应考虑的问题，并给出了模拟实例。

此书可供从事油气田开发的科研生产人员参考，也适合石油高等院校有关专业师生使用。

油气田开发进修丛书

油藏数值模拟基础

韩大匡 陈钦雷 冯存章 编著

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京门头沟妙峰山印刷厂排版

北京怀柔燕文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 21 印张 520千字 印1—1,000

1993年2月北京第1版 1993年2月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0810-6/TE·756

定价：13.00元

丛书出版前言

当前世界科学技术发展日新月异，每年发表的科技论文在二千万篇以上，而文献的数量几乎是以每十年翻一番的速度递增；涉及多学科的油气田开发的技术进展及文献积累也不例外。因而从七十年代开始，各主要石油国家都越来越重视知识更新；重视在职继续教育，注意改善和提高技术素质；重视信息资源的开发，以促进油气田开发的现代化。例如国际著名的石油工程师协会（SPE）持续出版了评述型的石油技术专论丛书；美国石油地质家协会（AAPG）发行了该会讲师团在世界各地巡回进行继续教育的专题讲座系列；法国石油研究院（IFP）出版了一系列的提高型油田开发技术专著；荷兰及英国壳牌国际石油公司（Shell）也将历年培训教材以石油科学进展丛书的名义陆续出版，西德也出版了一套便携式入门型石油地质及工程基础丛书。这些具有不同特色、水平、范围的丛书竞相争艳，反映了国际石油界对智力投资和人才开发的重视。

我国因十年动乱造成石油教育的青黄不接，专业图书供应缺乏，脱产进修、技术信息交流都存在不少困难；党的十一届三中全会以后，在北京和各油田都曾举办了各种形式的培训机构，但还远不能适应生产发展和技术进展的需要以及技术人员的自修要求。

中国石油学会石油工程学会根据上述情况，并根据北京油气田开发技术培训中心的数年来教学实践，决定邀请有关人员成立“油气田开发进修丛书”编委会，聘请学有专长和实践经验丰富的专家教授，撰写若干专题性著作，并将陆续出版为广大油气田开发技术队伍服务。第一批的选题包括：砂岩油藏的沉积学基础，气藏开发工程基础，油气田开发测井基础，油藏物理基础，渗流力学基础，试井分析理论基础，油藏工程分析方法，油藏数值模拟基础，自喷采油基础，机械采油基础，酸化压裂原理，分层注采工艺，油田化学基础以及提高油藏采收率方法等。今后还将按技术进展和生产及培训需要，继续增加选题，邀请更多人士参与丛书的编撰和审查。

丛书的读者对象是大专毕业和从事油气田开发实践的工程技术人员。它着眼于巩固专题基础，加强知识反馈，促进技术更新。它不同于高等学校教材，也不同于一般专著。丛书的各个专题将分系统、科学地介绍基本概念，基本理论与基本方法。力求理论联系实际，反映技术进展动向，阐明技术问题，同时将综合反映出油气田开发技术的多个侧面及其内在联系。

考虑到有关专业术语、符号、量制尚待统一制定，因此丛书的专业符号尽量采用国际比较通用的石油工程师协会（SPE）、测井分析家协会（SPWLA）的标准符号，量制则按国家颁布的标准以求一致；关于专业术语将尽量协调一致，避免一义数名、一名多义。

由于我们的工作经验不足，在编辑过程中可能会出现一些缺点和问题，请广大读者看后提出宝贵意见。

中国石油学会石油工程学会

一九八三年七月

“油气田开发进修丛书”编委会

谭文彬 秦同洛 韩大匡 张朝琛 刘翔鸷
王乃举 万仁甫 赵芬 郑育琪 赵钧

前 言

油藏数值模拟是应用计算机研究油、气藏中多相流体渗流规律的新型数值计算方法。这种计算方法从50年代问世后得到了迅速发展，使油、气藏开发过程中难以求解的极为复杂的渗流及工程问题得以解决。特别是近十余年，随着偏微分方程数值解法和快速、大型计算机的飞跃发展，油藏数值模拟方法日趋成熟，建立和发展了一系列功能很强的软件，在油、气田开发方面得到了非常广泛的应用，成为提高油、气田开发科学决策水平的重要技术。

本书是作者在多年从事油藏数值模拟科研和教学工作积累的基础上，查阅了大量有关专著和文献写成的，目的是通过介绍油藏数值模拟基本原理和基本方法使油藏工程师能够掌握和应用这项新技术，同时也为石油高等院校油气藏工程专业师生提供了一本教学参考书。在编写本书时尽可能做到通俗易懂，由浅入深、由易到难，着重介绍基本概念、基本原理和基本方法，这样便于具有一般高等数学基础的读者进行自学。

在本书编写过程中曾得到石油勘探开发科学研究所和石油大学许多同志的帮助，在此表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免存在不足甚至错误，衷心希望读者批评指正。

作者

1991年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
第 1 节 油藏模拟方法概述.....	(1)
第 2 节 数值模拟的基本过程.....	(3)
第二章 主要渗流方式的数学模型	(7)
第 1 节 油气藏岩石和流体的物性参数.....	(7)
第 2 节 单相流体渗流基本微分方程.....	(23)
第 3 节 多相多组分渗流基本微分方程.....	(30)
第 4 节 边界条件和初始条件.....	(37)
参考文献.....	(39)
第三章 微分方程的离散化	(41)
第 1 节 导数的差商逼近.....	(41)
第 2 节 网格系统.....	(49)
第 3 节 边界条件的处理方法.....	(51)
第 4 节 椭圆型方程的离散化方法.....	(55)
第 5 节 抛物型方程的离散化方法.....	(64)
第 6 节 差分方程的相容性、收敛性和稳定性.....	(69)
第 7 节 柱坐标系统中微分方程的离散化.....	(79)
参考文献.....	(87)
第四章 线性方程组的解法	(89)
第 1 节 Gauss 消去法	(89)
第 2 节 主元素消去法.....	(95)
第 3 节 三对角方程组的追赶法.....	(99)
第 4 节 带状矩阵压缩排列消元法.....	(101)
第 5 节 D_4 方法	(106)
第 6 节 简单迭代法.....	(108)
第 7 节 Gauss-Seidel 迭代法.....	(113)
第 8 节 迭代方法的收敛性和敛速.....	(116)
第 9 节 超松弛迭代法.....	(123)
第 10 节 交替方向隐式方法.....	(130)
第 11 节 强隐式方法.....	(135)
第 12 节 各种方法的对比.....	(140)
参考文献.....	(143)
第五章 多相渗流问题的数值解法	(147)

第1节	隐式压力显式饱和度方法 (IMPES方法)	(148)
第2节	IMPES方法的稳定性	(172)
第3节	联立解法 (SS方法)	(175)
第4节	隐式交替求解方法	(195)
第5节	井的处理方法	(198)
	参考文献	(210)
第六章	油藏数值模拟中的几种特殊处理方法	(213)
第1节	过泡点问题的处理方法	(213)
第2节	网格取向现象及其处理方法	(222)
第3节	拟函数方法	(223)
	参考文献	(237)
第七章	油藏数值模拟新技术	(238)
第1节	油藏数值模拟技术发展简介	(238)
第2节	向量计算机与油藏模拟软件的向量化	(240)
第3节	解大型稀疏线性方程组的预处理共轭梯度型方法	(247)
第4节	局部网格加密技术	(254)
第5节	自适应隐式方法	(259)
	参考文献	(263)
第八章	油藏数值模拟技术的使用	(265)
第1节	油藏数值模拟研究的目的、步骤和指导思想	(265)
第2节	数值模拟方法的设计	(266)
第3节	历史拟合方法	(271)
	参考文献	(279)
第九章	油藏数值模拟实例	(282)
第1节	大型复杂油田——Prudhoe湾油田的数值模拟	(282)
第2节	底水油田排水采油方法的模拟实例	(292)
第3节	油藏层内油水运动机理的数值模拟	(296)
	参考文献	(303)
附录A	场论的几个基本概念	(304)
附录B	矩阵基本知识	(311)
	本书使用的法定单位与非许用单位换算表	(322)
	主要符号说明	(323)

第一章 绪 论

第 1 节 油藏模拟方法概述

我们知道，构成油藏的岩石是不均质的，孔隙结构十分复杂，孔隙中所含流体有油、气、水等，而且有些流体还含有多种组分。在油藏开发的过程中，为了提高开采效果，还广泛使用了注水、注气、注蒸汽以及注入其他化学剂等措施。这样，在油藏内所发生的往往是多种组分、多相流体的三维流动。如果考虑流体的非牛顿特性和流动过程中各相、各组分间以及流体与油藏岩石之间所发生的种种物理化学作用，则流动状态还要复杂得多。

为了认识流体在油藏内运动的规律，人们常使用种种直接观测的方法，如岩心实验、井下电视、油井试采，井下测试及开辟生产试验区进行试生产等。由于这些方法比较直观，所得结果易于为人接受，所以成为非常重要的油藏研究方法。但是，由于油藏深埋地下，直接观测常常要受到许多限制，所能观察到的也往往只是某些井点上的外观现象，具有一定的局限性。因此，通过各种模拟方法来认识油藏内流体运动的规律，就具有非常重要的意义。

油藏模拟方法大体上可分为物理模拟和数学模拟两大类。所谓物理模拟，就是根据同类现象或相似现象的一致性，利用某种模型来观察和研究其原型或原现象的规律性，这样的模型是物理模型。

物理模型又可分为相似模型和单元模型两种。相似模型是根据相似原理把自然界中的原型按比例予以缩小，并使原型中所发生的物理过程按照一定的相似关系在模型中再现。这样，人们就可以通过短时间的小型试验，迅速和直观地观察到油藏中的渗流过程，测定所需数据，以指导开发实践。为了使模型中的物理过程和原型相似，除了使模型的几何形态与所要模拟的油藏或区块相似以外，还必须从流体力学的理论出发，根据相似原理，提出相似准数，实现流体力学相似。这样，从理论上讲，模拟后所得的规律应该与原型的规律相似，将相似的模型所得结果经过还原就可直接用于原型。但实际上，要在实验室内严格地满足所有的相似条件是非常困难的，甚至是不可能的。因此在进行模拟研究时，应根据所研究问题的性质，具体地加以分析，抓住主要矛盾，确定哪一些相似准数起着主导的、决定性的作用，哪一些准数是次要的，可以忽略，而不应该对所有准数都不分主次地同等对待。只要抓住主要矛盾，就可以在一定程度上真实地反映流体在油层中的运动规律，从而加深对油藏动态的认识。

单元模型是由实际的（有时也可用模拟的）油藏岩石和流体所构成。实验时不按相似关系进行模拟，因而所得结果不能直接定量地推广到实际油田。但这种模型常用来研究油藏内各种物理现象的机理，所以单元模型研究也是实验室中经常采用的研究方法之一。

另一大类模拟方法是数学模拟。所谓数学模拟，就是通过求解描述某一物理过程的数学方程式（组）来研究这个物理变化规律的方法。自然界的物理现象，常常可以用某一数学

方程式或方程组来加以描述，这种方程式或方程组就称为原现象的数学模型。因此，所谓数学模型并不是一个实体模型，而是从物理现象中抽象出来，能够描述该现象物理本质的一个数学方程式（组）。

水电相似模拟（或简称电模拟）也是一种数学模拟方法。这种方法是利用多孔介质中的渗流过程和导电介质中电的流动过程相似的原理来进行模拟研究。简单地说，由于在多孔介质中牛顿流体层状渗流时流量与压差成正比，与渗流阻力成反比。同样，在导电介质中电流也和电压差成正比，与电阻成反比。这两者是相似的，服从同一数学规律，在数学上属于同一类方程。因此，虽然水电相似模拟看起来似乎是物理模拟，但实质上却是一种数学模拟方法。由于电模拟的制作和测量要比渗流物理模型容易得多，因此人们就用各种电模型如电网模型、电解模型等来研究渗流问题。但近年来，由于大型快速电子计算机的飞速发展，以及用电模型模拟渗流问题考虑的因素有限，所以这些模型在油藏模拟方面应用已越来越少。

用数学方法求解数学模型是最常用的方法。长期以来，人们一直用经典的数学解析方法来求出数学模型的解析解，也就是精确解。由于它直接求出各种物理量之间的数学函数关系，所以易于得到比较明确的物理概念，这是解析方法的一个很大的优点。但是，这种解析方法只能解一些比较简单的渗流问题，对于考虑各种复杂因素的渗流问题，如油层复杂的非均质变化及多维多相多组分等的渗流问题，它就无法解决。对于油田开发方面越来越多地使用的各种提高采收率新方法如火烧油层、注蒸汽、注化学剂等的驱油过程，就更无法用解析方法来求得各种复杂过程的精确解了。因此，50年代以来，随着电子计算机的发展及数值技术的广泛应用，人们开始使用数值方法来求解这些比较复杂的渗流微分方程组，从而形成了油藏数学模拟的最重要的分支——油藏数值模拟。

用数值方法求解数学方程式是一种近似的方法。用解析方法求得的解是用公式表达的各物理量间的函数关系。数值方法求得的解不是一个数学函数关系，而是分布在足够多的点上的一系列具体数值，以这些数值来近似地解答问题。虽然这只是一种近似的方法，但是只要所求解的点数足够多，就可以以足够的精度逼近解析解，更重要的是它可以使复杂的偏微分方程的求解成为可能，从而能够在满足工程问题所需精度的情况下，解决用传统的解析方法所不能解决的问题。特别是近年来，大型快速电子计算机的发展为油藏数值模拟的发展提供了强有力的手段，使其成为现代油藏工程中不可缺少的研究工具。现在，油藏数值模拟方法已可用于解决大量的复杂油藏工程问题。如砂岩油藏中考虑油层中各种非均质变化以及重力、毛管力、弹性力等各种作用力的三维三相多井系统的渗流问题，考虑多相、多组分间相平衡关系和传质现象的多相、多组分三维渗流问题，底水锥进问题，碳酸盐岩的双重介质渗流问题等；在注蒸汽、火烧油层、注聚合物、注胶束溶液、混相注气等包括各种复杂的物理化学过程的渗流问题研究中，也已取得显著效益。数值模拟方法不仅在理论上用于探讨各种复杂渗流问题的规律和机理，而且普遍用于开发设计、动态预测、油层参数识别、工程技术问题的优化设计以及重大开发技术政策的研究等。在国外，已经发展了成套的计算机软件，可用于各种类型油气田的开发研究。近年来更朝着向量化、集成化、模块化和智能化的方向发展，用来解决大型油田的模拟问题，以及各种更为复杂的问题。我国60年代初，开始了数值模拟方法的研究及推广应用工作。除从国外引进了某些模型外，也研制并成功地使用了不少适合我国油田实际的数值模拟软件，进行了一

油藏模拟和精细模拟的研究。实践证明,在我国油田开发工作中应用数值模拟方法其效果是显著的。

物理模拟和数学模拟都是研究油藏中渗流规律的重要手段,两者各有优缺点。物理模拟的主要优点是能够保持和模拟原型的物理本质,这是其它方法所不能代替的。特别是对那些物理机理还不够清楚的问题,首先要靠物理模型来进行研究,才能正确地从中抽象和提炼出反映其物理本质的数学关系,建立数学模型。即使对于已建立的数学模型及所求出的数值解,也常要靠物理模型来进行检验、改进和完善。因此,可以说物理模型是数学模型的基础。但是,由于实际油田的渗流问题十分复杂,如考虑各种非均质因素的多维多井等问题,要用物理模型进行完全严格的模拟是不可能的,而且物理模拟往往要花费大量的人力、物力,试验周期比较长,测量技术方面存在不少困难。所以,现在很少用大型的物理模型来模拟复杂的地质条件。而数学模拟恰恰在这方面有很多长处,它代价低,速度快,对于地质条件十分复杂的渗流问题,也可以在短时间内进行多种方案的运算和对比。因此物理模拟和数学模拟两者是相辅相成的,不能互相取代。物理模拟多用来进行物理机理的研究,并为数学模拟提供必要的参数,验证数学模拟的结果,提出新的更完善的数学模型等;物理模拟中的某些计算,则往往又要依靠数学模拟方法。目前解决大量的、需要考虑多种复杂因素的实际问题时,主要使用数学模拟。

解析方法和数值方法,是油藏数学模拟中使用的两种不同的方法,不能偏废。对于一些比较简单的工程技术问题,一般应用解析解的成果就已足够,而且这种方法物理概念明确,比较简单,易于为广大技术人员所掌握,因此仍有其广阔的应用范围。但是对于许多复杂的、解析法无法解决的问题,就要用数值模拟方法。在许多实际问题中,这两种方法也可以结合使用。

本书所要介绍的是油藏数值模拟的基本原理和基本方法。

第2节 数值模拟的基本过程

用数值模拟方法对油藏工程问题进行研究,必须建立和编制具有处理某一类特定油藏工程问题所需要的比较完善的计算机程序。然后使用者按一定的要求把描述油藏的原始数据及各种控制信息输入到计算机内,经过运算处理,就可以从计算机输出所需要的、具有一定精度的结果。下面概略地介绍一下数值模拟的基本过程。

一、建立数学模型

建立数学模型是进行数学模拟的基础。为建立一个数学模型,首先要对所研究的物理过程有清楚的认识,然后利用自然界中物理现象所普遍遵循的规律,如质量守恒定律和能量守恒定律,以及油藏内渗流的基本规律如Darcy定律等,写出描述这一过程的数学方程。在对一些复杂问题建立数学模型时,为了使问题易于求解还常常对物理过程做一定的简化和假设。一个好的数学模型,应该使所做出的简化和假设尽可能地符合实际情况。只有这样,才能使数学模型和它的解比较真实地反映原物理过程的本质。在建立数学模型的过程中,为了求得对原物理过程本质的认识,还常常借助于物理模型。

数学模型中的基本方程式所描述的通常是某一类物理过程所普遍遵循的基本规律。但

对一个具体过程来说,仅有基本方程式是不够的,还要包括规定该过程的特定条件和初始条件。在数学上这类条件统称定解条件。基本方程式加上定解条件就构成某一具体物理过程的完整的数学模型。

对于一些经常遇到的油藏工程问题,如油田的衰竭式开采、注水、注气以及气田和凝析气田的开发等已经建立了比较成熟的数学模型。在解决这类问题时,只要选择一种合适的模型,再加上具体的边界条件和初始条件就可以进行求解了。

本书第二章将较系统地介绍油藏工程中现有的几个常用数学模型。

二、数学模型的离散化

数学模型建立后,对模型进行数值求解的第一步是偏微分方程离散化。

所谓离散化,就是将偏微分方程近似地转化成比较容易求解的代数方程组。换句话说,就是将渗流方程中微分意义上连续的物理关系近似地表示成有限个相互联系的、具有一定体积和时间单位的单元体(或节点)间的物理关系,以便进行数值计算。

一般说来,数学模型所描述的基本规律是独立于所选坐标系的具体形式的。如渗流方程,它所描述的流体质量守恒关系在各种形式的坐标系中都是成立的。因此在对数学模型进行离散化处理时,首先应确定在什么样的坐标系中进行。合理坐标系的选择依所研究问题的形式及目的而定。如研究油藏整体或一个剖面上的动态时,一般采用直角坐标系;而在研究单井锥进问题时,则一般采用柱坐标系;在某些特殊情况下,为了方便起见,还可以采用其它形式的曲线坐标系。有时,一个数学模型可能已表示成某种坐标系下的特殊形式,如果该坐标系和所选用的坐标系不一致,在对数学模型进行离散化时,应先对模型进行坐标转换。

有限差分法或称差分法是油藏数值模拟中应用最早、也是迄今为止应用最广的一种离散化方法。这种方法的基本原理就是以差商来近似地代替偏导数,从而以差分方程代替微分方程。目前看来,无论是单相渗流还是多相渗流、单组分流动还是多组分流动、一维流动还是三维流动问题的处理,差分法都是一种比较成功和有效的方法。

有限单元法是其后发展起来的对数学模型离散化的另一种方法。该方法最初是为研究和解决结构力学问题而提出的。目前,在结构分析、流体力学计算等方面已经成为广泛应用的有效方法。在油藏数值模拟研究中有限单元法虽已在前缘追踪等问题上有所应用,但远没有有限差分法的应用广泛和成熟。

本书所讨论的仅限于目前油藏模拟中应用最广泛的差分方法。利用差分法对数学模型进行离散化的具体方法,将在第三章中介绍。

三、建立线性方程组

用差分法把偏微分方程离散化以后,所得的代数方程组称差分方程组。一般说来,如果这些偏微分方程式(组)本来就是线性的,那末离散化以后所得到的差分方程组也是线性的,可以直接求解。但油藏模拟中的多相渗流方程组常常是非线性的。也就是说,偏微分方程组的各项系数如传导系数和对时间导数项的系数本身就是未知变量,即所求的解的函数。因此,这种非线性偏微分方程离散化后,所得的仍然是一个非线性差分方程组,需要

采用某种线性化方法，将此非线性差分方程组线性化，而成为线性的差分方程组，或者还要用某种方法迭代地进行求解。在油藏数值模拟中，常用的线性化方法有显式方法、半隐式方法、全隐式方法等。采用什么样的线性化方法，不仅对计算工作量产生很大的影响，对解的性质也会产生很大的影响。因此，这是油藏数值模拟中较为复杂的问题之一。关于各种线性化方法，本书将在第五章中加以介绍。

四、线性方程组求解

对数学模型离散化并线性化的结果，是在每一个求解点即网格节点上得到一个(对单相)或多个(对多相、多组分)线性代数方程，每个方程除含有本点上的未知变量外，一般还含有相邻节点上的未知变量。因此，为了求得线性方程的解，需要将各点上的方程联立，形成联立代数方程组。这样，在实际油藏数值模拟中，要进行求解的往往是几百乃至几千、几万阶的线性代数方程组。用计算机求解时，需占用大量的内存并耗费大量的计算时间。如何寻求一种更有效的方法，充分利用有限的计算机设备，完成尽可能多的工作，就成为解线性方程组时所必须考虑的重要问题。

求解线性代数方程组所用的方法有直接法和迭代法两大类，直接法常用的有高斯消去法、主元素消去法、D4方法等；迭代法常用的有交替方向隐式方法、超松弛迭代法、强隐式方法等。本书将在第四章中系统地介绍这些方法。

五、编写计算机程序

在完成了上述的各个步骤后，下一步所要进行的是求解具有大量数学公式的计算过程。在实际模拟工作中，要完成这些计算，必须借助于计算机才能实现。为此，研究者必须利用程序设计语言编制计算机程序，将上述全部运算过程都用程序语言表示出来，也就是写成计算机模型或软件。

计算机程序设计工作是一项技巧性很强的工作。设计者不仅要熟知程序设计语言，也应具备一定的计算机功能及操作系统的知识。一个好的计算机程序不仅应该考虑提高计算速度和合理利用内存问题，而且要尽量使用户使用方便。因此，下面是程序设计者应该注意的：①输入方便，输出清楚、直观；②便于在不同的计算机上实现；③可以重新启动；④便于进行错误查询和修改。输入方便，要求设计者考虑不同用户的需要，使数据可以以不同的方式输入，同时还可以减少那些对某些用户来说不必要的数据输入。为了使程序能够在不同的计算机上实现，要求设计者尽量避免和减少只有某种特定的计算机才能实现的程序和指令。重新启动功能是指可以让程序在任何一个时间阶段停止计算，并且可以从该阶段重新启动继续计算；或者在计算过程完成后，在已经算过的某时间点上开始重新计算。做到这一点，要求程序设计者对计算机的文件管理系统有一定的了解。错误查询主要是指程序对不合理的输入数据自动给出信息，便于用户改正。

目前常用的程序设计语言有适合于进行科学和工程计算的FORTRAN和ALGOL语言，有具有人机对话特点而且简单易学的BASIC语言，有适于进行数据处理的COBOL语言，有适合作信息加工和人工智能的LISP语言，以及能够方便地调用系统功能的C语言等。

目前油藏数值模拟所用的软件大都以FORTRAN语言写成，因此对油藏数值模拟工作者来说，FORTRAN语言是最重要的。但一些能用微机解决的较简单的问题，也常用BASIC语言。

我们应当密切注视程序语言发展情况，在模拟中选用功能强，便于使用的语言。而关于程序语言与程序设计的具体技术问题，已超出本书范围，不再详述。

以上介绍了编写软件时的一般过程，但是，在实际工作中一个好的软件的建立，并不是一次可以完成的，而是要经过大量的反复工作，在这过程中不断发现问题和解决问题，从而使软件不断完善。即使一个软件已经投入了实际使用，在使用过程中仍要不断地根据应用中所发现的问题进行改进和完善。另外由于考虑到不同用户的需要，在一个软件中往往包含几种解法，对不同的问题，可选用其最合适的解法。

第二章 主要渗流方式的数学模型

应用数值模拟方法来研究油田开发问题，首先必须根据油藏的实际渗流情况建立数学模型，即建立基本渗流方程式及相应的定解条件，形成一个完整的数学方程组。

在油气藏中所发生的渗流是多种多样的：可能是单相流动，又可能是两相或三相同时流动，有些流动还可能伴随着相间的传质现象。在流动过程中，有多种作用力如粘性力、毛管力、重力等起作用。渗流所通过的多孔介质，也常常具有严重的非均质性，即孔隙度、渗透率等处处不同。油藏的边界形状各异，而且有的是封闭的，有的则和外面的水体相连通等。这些复杂的情况，都应该被概括、反映在油藏的数学模型中。这些数学模型就是本章的讨论对象。

由于渗流是各种流体在岩石这种多孔介质中所发生的流动，所以要研究能反映各种渗流过程的数学模型，必然要涉及到岩石及其中流体的各种基本特性。一般来说，这是油层物理学所研究的内容。

由于一般油气藏内的渗流过程，都可以看成是等温过程，所以其渗流基本方程式主要由运动方程即达西定律和物质守恒方程即连续性方程所构成。对于非等温渗流还要加上能量守恒方程。这在研究注蒸汽等进行热采的问题时是必须考虑的，本书不予详述。此外，在公式推导过程中还常常要考虑有关的状态方程和其他的辅助方程。本章先导出比较简单、也是最基本的单相渗流偏微分方程，然后把它推广而导出多相以及多组分的渗流方程组。

最后，对渗流方程的定解条件作概要介绍。

第1节 油气藏岩石和流体的物性参数

油气藏岩石和流体的物理性质及其相互作用，是油层物理学的研究内容。本节仅就其与油藏数值模拟密切相关的一些参数如相对渗透率、毛管压力曲线、油藏流体的某些高压物性参数如体积系数、粘度、溶解气油比以及压缩系数等作一概要介绍。并着重说明后面各章经常用到的一些特性参数及其相应的函数关系。

一、油气藏岩石的相对渗透率

油气藏岩石允许某一种流体在其中通过的能力称为油气藏岩石的绝对渗透率。绝对渗透率是岩石自身的一种属性，不随通过其中的流体性质而改变。一般把岩心中通过空气时所测得的渗透率值作为绝对渗透率值。

实际的油气藏多是油、水、油、气，甚至是油、气、水三相共存。绝对渗透率的概念不能表达多相流体在岩石中的渗流特性，必须引出有效渗透率的概念。

有效渗透率是当多相流体共存时，岩石对其中某一相流体的通过能力。因此，它与岩石自身的属性、流体饱和度及其在孔隙中的分布有关。而饱和度及其在孔隙中的分布则又与润湿性及饱和历史有关。

相对渗透率则是多相流体共存时，每一相流体的有效渗透率与岩石绝对渗透率比值。实验证明，岩石中某一相流体的相对渗透率主要是该相流体在岩石中饱和度的函数。图2.1就是一组典型的油水相对渗透率与饱和度的关系曲线。

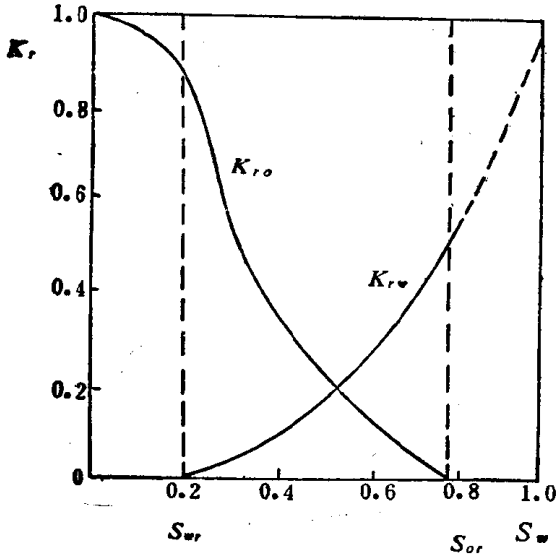


图 2.1 油水相对渗透率-饱和度关系曲线

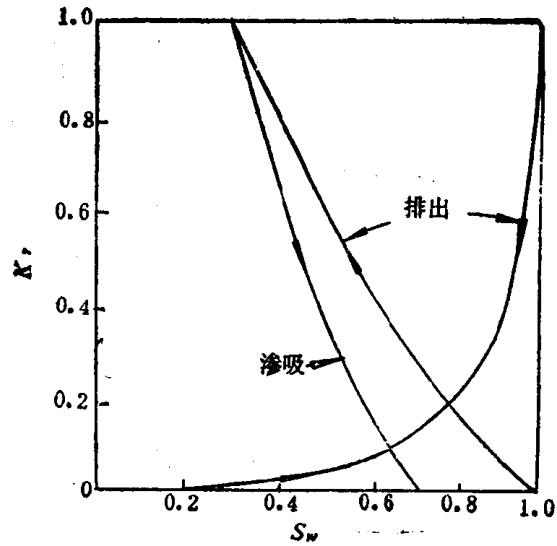


图 2.2 驱替和渗吸过程的相对渗透率曲线

图2.1是一组亲水岩石的相对渗透率曲线。此时油层中水为润湿相，原油为非润湿相。实验也证明，在油气系统或水气系统中测得的相对渗透率曲线，也具有上图润湿相和非润湿相曲线的一般特征。不过原油与气相比，则原油为润湿相而气为非润湿相。

流体饱和的历史或饱和的顺序，既影响流体的分布状况，也将影响相对渗透率曲线和特征。图2.2便是考虑了这种影响的驱替和渗吸过程的相对渗透率与润湿相饱和度关系曲线。可以看到，对于润湿相来说不管是驱替过程还是渗吸过程其相对渗透率曲线基本上是重合的，而对非润湿相则渗吸过程的相对渗透率曲线总是低于驱替过程的曲线。

润湿性的变化也将对相渗透率产生影响。图2.3和图2.4分别给出了强亲水岩石和强亲油岩石的典型相对渗透率曲线。

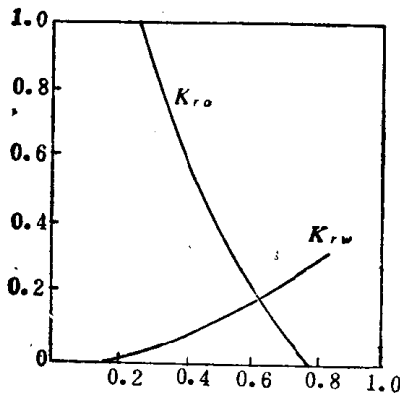


图 2.3 强亲水岩石典型相对渗透率曲线

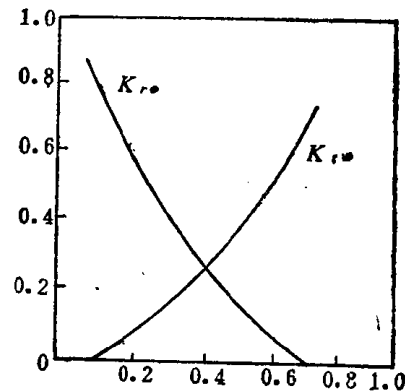


图 2.4 强亲油岩石典型相对渗透率曲线

对于油、气、水三相流动的情况，经实验研究可作出如图2.5所示的油、气、水三相相对渗透率与饱和度的三角形关系曲线图。它是把各相相对渗透率为1%的等值线综合绘成

的。由该图可以分析在什么样的饱和度组合条件下，可以发生单相、两相或三相流动。图中心三条等值线交汇的区域便是三相可以同时流动的范围。

由上所述，虽然影响相对渗透率的因素是多样的，但总起来看相对渗透率主要仍是饱和度的函数。在数值模拟中，我们把相对渗透率作为饱和度的函数来处理。至于饱和度和历史和润湿性等，则以输入代表各具体条件的相对渗透率曲线的办法来解决。而且在第五章中可以看到，相对渗透率和饱和度函数的非线性特性，是渗流微分方程组呈非线性的主要原因。

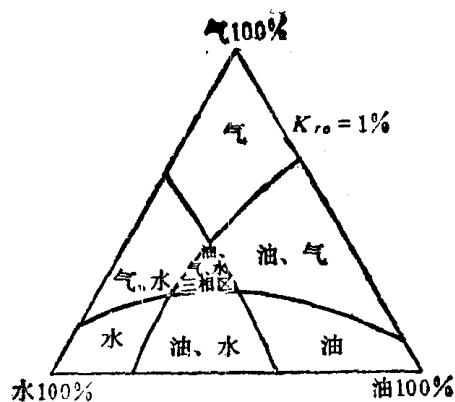


图 2.5 油、气、水三相渗透率与饱和度关系曲线示意图

油藏数值模拟中所用的相对渗透率曲线，最好是选用能代表所模拟储层的实验室资料。通常，不难取得两相流动油、水或油、气等相对渗透率曲线的实验资料；但是对于三相相对渗透率曲线，目前还难以从实验室得到。因此，如何使用实验室可以得到的油、水和油、气这两组两相相对渗透率曲线来求得有代表性的油、气、水三相相对渗透率资料，对于模拟三相流动具有重要意义。

根据Leverett、Lewis、Corey及Snell等人的三相渗流实验研究，发现在亲水岩石中作为润湿相的水，它的相对渗透率可近似地看成仅仅是水饱和度的函数；同样，对于非润湿相天然气来说，其相对渗透率也近似地看成仅是气饱和度的函数；而作为中间润湿相的原油，其相对渗透率则较为复杂，是各相饱和度的函数，可以把它作为水和气饱和度的函数（因 $S_w + S_g + S_o = 1$ ，只要确定其中两个饱和度，第三个也就被确定了）。亦即

$$K_{rw} = f(S_w) \quad (2.1)$$

$$K_{rg} = f(S_g) \quad (2.2)$$

$$K_{ro} = f(S_w, S_g) \quad (2.3)$$

这就是说，三相流动时水的相对渗透率也和油水两相流动时一样都仅是水饱和度的单变量函数，只是三相流动时把非润湿相看成是油相加气相的和。因此，可以认为，三相流动时水的相对渗透率和水饱和度的函数关系与油水两相时的函数是相同的。对于气的相对渗透率也同样，在三相流动时也和油气两相流动一样仅是气饱和度的单变量函数，只是把全部液体（油加水）看成是润湿相，从而也可以认为三相流动时气的相对渗透率和气饱和度的函数关系与油气两相时的函数是相同的。这样，就解决了三相流动中水、气相对渗透率的问题，只要再把三相流动时的油相对渗透率 K_{ro} 也通过油水流动和油气流动时两个油的相对渗透率 K_{row} 及 K_{rog} 来表示，问题就全部解决了。

求 K_{ro} 的最简单方法是

$$K_{ro} = K_{row} \cdot K_{rog} \quad (2.4)$$

式中 K_{row} ——油水两相流动时油的相对渗透率；

K_{rog} ——油气两相流动时油的相对渗透率。

Stone根据多相渗流时各相流体各走各自的路径的分相流动的设想，先后在1970年和1973年提出了两个更为精确的模型。