

现代油藏工程—— 模拟计算

[美]亨利·布·克里奇 著

石油工业出版社

北京)

19

现代油藏工程 ——模拟计算

〔美〕亨利·布·克里奇娄 著

葛家理 胡祖修 林平一 译
孙长明 刘青年 吴 湘 校

石油工业出版社

7753/106

内 容 提 要

本书概括地介绍油藏工程模拟计算的基本原理。叙述了模拟方程的建立及模拟方程的解,有限差分模型的建立、数据准备、编制模拟的研究、生产史匹配参数以及最优化的模拟等内容,并列有实例。是专为新从事油藏工程专业的工程技术人员学习和掌握油藏工程模拟计算技术而编写的一本基础性参考用书。适合从事油藏工程的科技人员以及各石油院校有关专业师生阅读。

HENRY B. CRICHLLOW
MODERN RESERVOIR ENGINEERING—A
Simulation Approach

Prentice-Hall Inc.
Englewood Cliffs, New Jersey 1977

现代油藏工程——模拟计算

[美]亨利·布·克里奇娄 著

葛家理 胡祖修 林平一 译

孙长明 刘青年 吴 湘 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)

通县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 10¹⁵/₁₆印张 249千字 印1—1,200

1986年9月北京第1版 1986年9月北京第1次印刷

书号: 15037·2489 定价: 2.15元

前 言

本书主要是为石油工业见习工程师以及准备从事油藏工程职业的工科学生而写的，也适用于经常与现代油藏模拟工程师打交道、想更充分地了解有关该特殊学科某些概念的经理、教员以及其他专业人员。本书所涉及题目范围是打算让油藏工程模拟法解析技术基础已遗忘得差不多的人重新恢复起来。

本书的宗旨在于集中讲述要点，而不过于琐碎使内容模糊不清。在需要详细叙述的部分，作者力图严密地将观点或概念讲清楚。为较富于探索的工作者广泛地提供几百篇参考文献，以满足其热切的渴望。作者预先假定工程师对油藏工程已稍有接触，或者至少对于试图采出全部石油而献身的人们所使用的术语是熟悉的。

向读者建议

在这类的书籍中，要强调某些章节，对不同的人就会感到太浅或太深。实在不可能全都满足！但是，读者应该了解自己的需要，然后择取自己最感兴趣的题目。喜欢数学的人，不会去关心流动概念和资料准备，便可适当地删去其中某几章；在矿场办公室工作的工程师，不可能对数学稳定性分析过分兴趣，他就可跳过这个部分。

下表就书内各章可能使未来读者感到兴趣的地方提供一些线索。在最后的分析中，只有见习生才真正知道自己的需要，他可略去某几章一些节，并不丧失其连贯性。

	实际工程师	模型研究者	模型实践者	新的实践者	见习工程师
章	2	2	2	2	2
	3	4	7	7	3
	4	5	9	8	4
	7	6	11	9	5
	8	11		11	6
	9				7
					8
					9
					10
					11

亨利·布·克里奇娄

目 录

前 言

第一章 引言——模拟时代	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 模拟的发展	(6)
1.3 油藏模拟的目的	(12)
1.4 模拟的益处	(18)
参考文献	(19)
第二章 模拟中的油藏工程概念	(20)
2.1 引言	(20)
2.2 流体类型	(33)
2.3 孔隙介质中的流动	(34)
参考文献	(39)
第三章 油藏模拟方程的建立	(40)
3.1 引言	(40)
3.2 方程式的推导	(42)
3.3 多相流方程的推导	(47)
3.4 多组分系统	(57)
参考文献	(64)
第四章 建立有限差分模型	(65)
4.1 引言	(65)
4.2 有限差分格式——显式和隐式的概念	(69)
4.3 网格的确定	(77)
4.4 稳定性判据	(78)

4.5 事例研究：显式和隐式概念	(85)
参考文献	(97)
第五章 模拟方程的解法	(98)
5.1 解题方法	(98)
5.2 隐式压力-显式饱和度(IMPES)法	(99)
5.3 隐式压力-隐式饱和度(联立解)法	(107)
5.4 上游及下游的相对渗透率	(111)
参考文献	(119)
第六章 联立方程矩阵的求解	(120)
6.1 引言	(120)
6.2 联立线性方程的概念	(121)
6.3 模拟实用迭代法	(131)
6.4 模拟实用直接法	(153)
6.5 对比分析	(158)
参考文献	(160)
第七章 数据的准备	(161)
7.1 引言	(161)
7.2 流体数据	(162)
7.3 岩石数据	(167)
7.4 生产数据	(205)
7.5 流量数据	(206)
7.6 事例研究：一个气藏的模拟	(207)
参考文献	(216)
第八章 模拟研究	(217)
8.1 模拟运行机理	(217)
8.2 模拟程序框图(流程图)	(222)
8.3 模型的选择	(223)

第九章 生产史匹配.....	(241)
9.1 引言.....	(241)
9.2 岩石数据的修改.....	(243)
9.3 流体饱和度的修改.....	(247)
9.4 流体数据的修改.....	(248)
9.5 相对渗透率数据的修改.....	(249)
9.6 存在连通面积的情况.....	(251)
9.7 自动生产史匹配方法.....	(252)
9.8 事例研究：一个二次采油设计的模拟.....	(258)
参考文献.....	(263)
第十章 模拟器内的井.....	(264)
10.1 引言.....	(264)
10.2 显式产量.....	(269)
10.3 多单元井的一般推导.....	(274)
10.4 运算参数的选择.....	(279)
10.5 油层内流体的运移.....	(285)
10.6 注水井网——扫油面积.....	(288)
10.7 事例研究：多层系统的两相产量.....	(291)
参考文献.....	(298)
第十一章 最优化和模拟.....	(299)
11.1 最优化的概念.....	(299)
11.2 线性规划.....	(300)
11.3 在石油工程中的应用.....	(308)
11.4 关于储气最优化的应用.....	(314)
11.5 事例研究：储气层的最优化.....	(321)
11.6 应用于多层系统.....	(332)
参考文献.....	(341)

第一章 引言——模拟时代

1.1 引言

辞典将“模拟”简单地定义为“给予重现”。对于工程师或分析者来说，“模拟”包括利用模型来对物理过程中的动态作些观察。模拟是一个过程或者机理，通过它能够深浅不同地研究特定的问题，以取得答案或者证实假说。在许多应用科学学科里，人们长期把模拟视为最后凭借的手段；正如瓦格纳说得好：“当所有的其它办法都失败时，……模拟”。在运筹学中，已广泛地应用模拟研究，例如：

1. 运输模型网络
2. 证卷市场动态
3. 电报系统设计
4. 自动售货市场结帐计算器

由于某些范围的广泛需要，已研制出专门的语言，以适应模拟的特殊要求。

然而，模拟涉及的远比上述设计和应用良好的模型来分析过程所包含的内容要多得多，即使它是一个油层系统或是网络转换问题也是如此。对于不同人来说，“模拟”这个字会变成不同的东西。某些人对模拟概念的理解近似于不可思议的：模拟器是一个未知数的黑盒子^①。它奇迹般地产生在某方面视为神

①黑盒子(black box)又称未知框，即没有明确给出内部结构的装置或框图。

圣的结果，产生的全部有效数字都是绝对正确的数字。这是不保险的模拟方法。更为实际地说，模拟是一种过程，工程师从中可汇总许多因素而产生信息，根据这个信息，经理能够作出理智的决断。他从这个方案选择最好的工具。即是最好的模型开始。再加上他的专长，对资料质量的理解，特别是资料的来源；那末他就产生出建议和结论形式的成品，而这些建议和结论在企业活动范围内是可用的。各方面都这样的话，工程师就是通晓情况的。即便模拟过程所作的没有什么能够改进他的工作质量，但是模拟过程一定能使他很好地了解他的方案中所发生的许多过程的相互关系。

计算机系统的成长是发展模拟必要的先驱。工程师们长期以来就了解到用于他们研究的大多数物理现象的指导法则，但是缺乏解决这些问题的工具。当计算机发展起来时，模拟也随之而发展，几乎像两个扩展的同心波的内部那样。有时，看来模拟的需要会超过计算方法；但是，在这两个动态范围中似乎常常有一个工作媒介。工程师用他有用的东西，常能有效地进行生产。无疑地，当计算机技术不断创新时，工程师在运用他的经验来解决日益增加的问题中，一定会步调一致地大力推广它的用途。

模拟的必要性

解决问题的传统方法是系统地阐述问题，然后试图作出许多尽可能简化的假设，以得到一个易于处理的新问题。如果甚至在作出所有这些简化的假设后，问题仍然难以处理，那情况又会怎样呢？此时，有两种方法。首先，他可以把问题说成是没法解决，有点像古代炼金术士提出燃烧的燃素理论所作的那样。他们知道理论是错误的，但他们仍然给了它一个名字。给疑难点一个名字与一开始就把它留下一样，不解决问题。第二

种办法，他能借助于最可利用的技术试着来解决，并且在某点上得到他所满意的回答。这不是完全的答案，这种认识决不会有损他利用结果。实际上，这样的情况是极少的：没有答案比有一个近似答案更好。当问题复杂性开始增加时，解析手段就变得不太有效，这一点是很明显的。在采油工程学科中，物理过程的复杂性是普遍的规律，很少是例外。今天需要工程师不仅根据该系统的物理特征能确定出最好的动态，而且还要不断了解他的决定与经济、管理、法律和外界影响的相互作用。所有这些一起起作用，产生了如此复杂的情景，以致任何有用的解析都必需将它们全部组合起来。这样建立起的复杂性，自然适用于某些模拟过程，从而能更为关键性地研究各种参数对解答的影响。这好像在模拟方式中，在它付诸实施前，整个过程必须多次重现一样。

模拟法

以前有人说过：“人们的智力在作一个决定时，很难同时考虑10到20个以上的因素。”在开发和开采任何大小的石油资源时，工程师所面临作出决定的问题都涉及好几百个变量。这些变量也许不采取容易确定的形式给出数量或列成表，但是它们是存在的。因此，工程师必须对开采动态、完井技术、泵的尺寸、井位以及每口井的作业特点作出决定，同时必须在涉及连续变化的时间范围内确定所有这些资料。好的工程师和经理过去采用直观法，而且在许多情况下他们已获成功；那些直觉不高明或者“逻辑”推理缺乏那种敏感力，“洞察力”的工程师和经理，在今天更不用提了。为了给经理或者工程师的方法论添些内容，我们需要一种有训练的技术，使我们能确定与某一解法有关的因素以及它们的相互关系。此外，这种技术应使我们有效地执行决定，并且为适应现代化、改进和重新确定我们的系

统和我们前进的目标提供某些方法。模型法能最紧密地将所有这些属性结合起来。

模型基本上有二种类型：一是按普通的方式，简单说来，它们是你能摸得着的。另一类是你摸不着的。前者是物理模型，后者是数学模型。

1. 物理模型主要是按比例缩小的原型复制品，正如典型的试验装置、样机等等所证明的，或者是在物理上复制与原型相同过程的模型，即使这个过程是在一组不同物理定律下进行的。这种情况的最好例子是电位计模型，由于利用孔隙介质中流动和电势场内离子流动之间一一对应关系，可把它用来预测油层流动。

2. 数学模型是描述所研究过程物理状态的数学方程系统。在油藏工作中，这些方程一般是非常复杂的偏微分方程，但是在其它场合，它们可能是相当容易的方程系统。由于这些数学模型的尺寸和复杂性，需要用计算机来求解该系统。

全本书中，“模型”这个字指的是数学模型，并且可以与“模拟器”或“模拟”交换使用。

数学模拟法和工程师所起的作用可用图 1, 1 所示的框图加以形象化。中心框是模拟器；表达和推演它要求有坚实的数学和应用科学基础。但是，使用它，只需要良好的工程技能和常识。如图所示，在数学模拟中有一反馈环路。模拟器在计算机环境下操作（“环境”一词用得不十分确切），并且每件事也是在工程装置中进行。此过程从工程师提供的输入开始；由模拟器加工并且得到输出。在此，就上述变化对运转特征的影响对信息进行分析，若需要修正，则作修正并重复此过程。当工程师依次转完这回路时，靠他熟练的技能，他提供的输入可不断地提高结果的级别。当更多更好的信息随着时间的流逝而变得有

用时，他就能给自己的程序制作一个有效、合理而精确的预测工具。

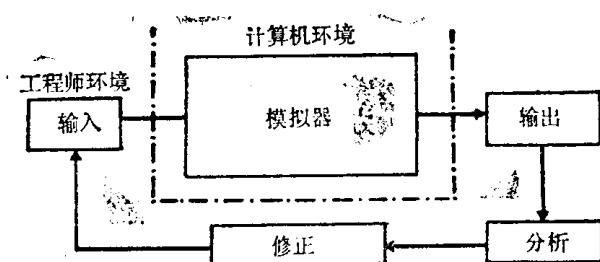


图1.1 数学模拟

工程师正使用试验过的技术，试图定量地作出决断，使他的设计方案最优化。今天，模拟技术已经发展、改进、更加着重于应用达到了如此程度，以致工程师或科学家，谁不开始利用这些方法，谁就可能发现他自己要与他的同级联系要跨越一个日益增大的距离。今天强调经济的合理性，以及需要用技术保证来支持所有的决断，都无情地推动着他去使用模拟的策略。

油藏模拟

油藏模拟的范围是把数学模拟的概念和方法运用于油藏系统动态分析。狭义地说，“油藏模拟”这个术语仅仅是指油藏内液流的水动力学，但广义而言，它能够而且更经常地是指整个石油系统，包括油藏、地面装置以及任何相关的重大活动在内。基本流动的模拟是由控制油层介质内全部流体相不稳定流的偏微分方程组成。求解这些方程所需的全部算法也编入该模拟内。因此，模拟器是特定数字机进行数学模拟的计算机程序的收集器。图1、2表示模拟器的起源和合成的相关整体的综合法。

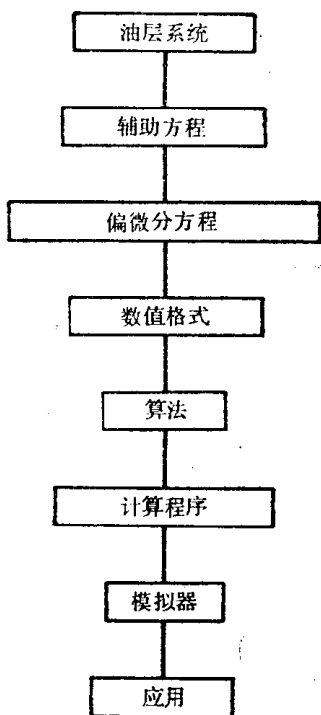


图1.2 模拟器的起源

1.2 模拟的发展

油藏模拟的发展是与近30年间技术的高涨并行的。工程师总是尽力使用他可能得到的最好工具来了解油藏和石油开采机理，并且把它们应用到油藏的有效工作上。今天，模拟的应用已经使计算机如同20年前的计算尺和台式计算机那样地成了日常的工具。下面我们将探讨在模拟发展中用来模拟油藏动态的某些技术，并指出其中每种方法的弱点是怎样为新方法所解决的。由于经济上仍然合理、技术上正确，其中某些方法至今仍在使用着。一个明显的例子就是物质平衡方程。

物质平衡方程

1936年希尔素伊斯²提出了石油储层的守恒方程。这个方程的推导是把整个油层看作均匀岩石和流体性质的均质贮容器。考虑经过一段时间后可能进入或离开储层的全部数量构成质量平衡。有时质量平衡方程指的是零维模拟器，因为该系统内没有任何方向的变化。饱和度和压力连续分布在整個贮容器内。并且压力的任何变化在整个系统内是瞬时的。图1.3说明物质平衡方程的基础。完全方程表示如下：

$$N_p[B_i + B_g(R_p - R_{ri})] + W_p = N[(B_i - B_{ri})]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{B_{ti}}{1 - S_{wi}} (C_f + S_w C_w) \Delta P + \frac{m B_{ti}}{m_{gi}} (B_g - B_{gi}) \\
& + W_e + W_i + G_i B_g
\end{aligned} \quad (1.1)$$

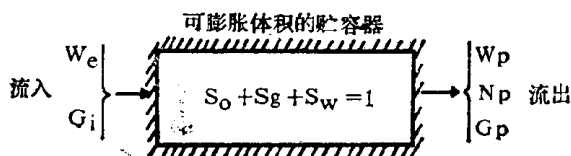


图1.3 物质平衡方程

左边代表油、气和水产量，而右边各项指的是岩石和岩石孔隙内流体的膨胀和水侵入量及注入水量。采用各种代数运算，基本方程可以重新排列，以解出以下任一参数：

1. 石油储量；
2. 水侵入量；
3. 气顶大小和气储量；
4. 产油量。

物质平衡法可图解或计算求解——最近，物质平衡方程由奥德和哈夫伦娜³解析为一直线——但是物质平衡法的基本前提涉及以下比较严重的弱点：

1. 不允许储层内流体和岩石性质随地点而变化。
2. 忽略了该系统内流体运动的动力作用。当物质平衡方程中的这些缺点得到克服时，油层分析就可进一步发展。下一个方法是使用阻-容网络。

类似阻-容网络³

类似阻-容网络，通称电分析仪，应用电流和油藏流体流动的相似性，导得油藏电模拟。分析不同工作条件下电流参数随着时间的变化，采用适当的转换系数，便可计算出油层动态。

由下面两个方程可以看出这两个系统间的类似关系：
流体流动：

$$q = \frac{kA}{\mu L} (P_1 - P_2)$$

$$q_1 - q_2 = V_c \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1.2)$$

电流：

$$i = \frac{1}{R} (E_1 - E_2)$$

$$i_1 - i_2 = C_x \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.3)$$

参数对应示于表1.1中。

阻-容网络通常是二维油层网络，如图1.4, 1.5, 1.6例子所示。图中伍德宾盆地油层用阻-容模拟。方程(1.2)和(1.3)表示下列参数间的一对应关系：

$$q \approx i$$

$$\frac{1}{R} \approx \frac{kA}{\mu L}$$

$$P \approx E \quad (1.4)$$

表1.1 流体和电流系统间的对应

流 体 系 统		电 流 系 统	
项 目	单 位	项 目	单 位
压 力	磅/英寸 ² (P)	电 压	伏特(E)
产量/注入量	桶/日(q)	电 流	微安培(i)
流体容量 (储存)	桶/磅/英寸 ²	电 容	微法拉
传导能力 ($\frac{kh}{\mu}$)	达西/英尺 厘泊	电导率	欧姆
实际时间	月	模拟时间	秒

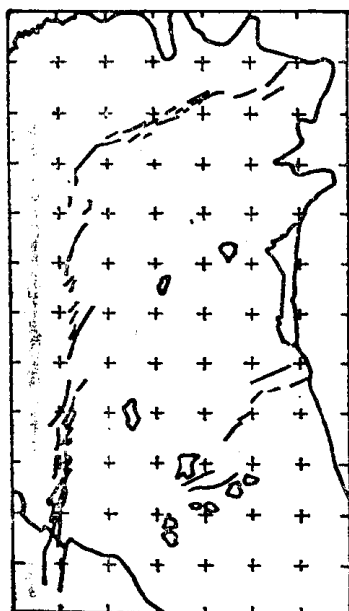


图1.4 伍德宾盆地的一部分

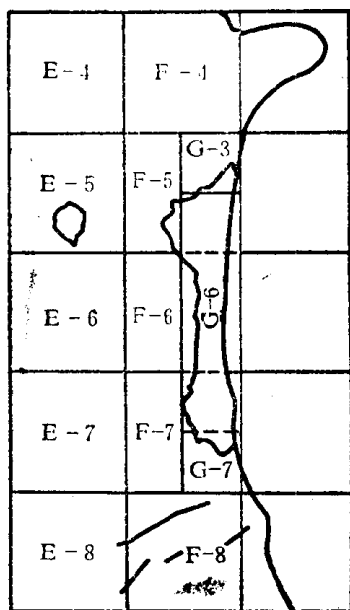


图1.5 东德克萨斯油田
附近部分区域

给定网络的电阻是根据油田给定部分岩石具有的渗透率来计算。电路中电容变化时，所测得的电的参数是电压和电流。

电解模型

致力于分析油层流体前沿运动的几个研究者，如博策特、威科夫、麦斯盖特研制了稳态电解模

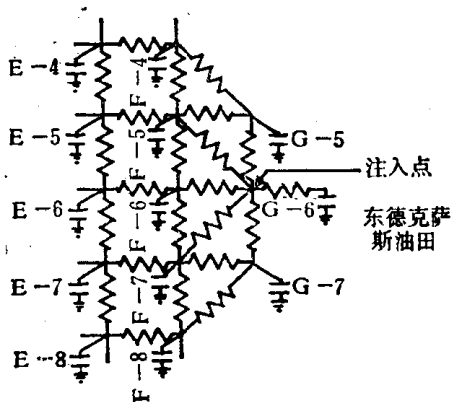


图1.6 电阻器网络