

复杂油藏模拟技术

J.G.Hillestad

Exxon Production Research Co.

齐与峰 译

谢兴礼 唐养吾 校

摘 要

计算机软、硬件的发展,为油藏工程师分析和预测油藏动态提供了广泛的选择余地。善于经济地使用大型模拟,将可以为我们获得更精确的技术答案和发展更大更复杂油藏的全油田模型提供一种手段。然而,目前仍有些情况,不是因为油藏复杂就是因为尺寸过大,致使模拟全油田尚不现实。因此,分节模型仍将继续是油藏动态分析和开发设计的重要部分,并且使用拟相对渗透率和毛细管压力函数等近似方法仍然是很必要的。

前 言

近年来,有许多因素使人们越来越多使用更复杂的大型数值模拟来分析和预测油藏动态。向量计算硬件,更有效的数据储存和传输,以及特别适用于向量处理机的编码技术的发展,所有这些,在数值模拟的发展过程中起到了重要的作用。大约五年前,含有10000到20000个节点的模型曾被认为是“大型模型”,而今日含有50000以上节点的模型也是很平常的了。

有许多因素对大模型的发展有影响,其中精度、计算费用与人工费用之间的利弊权衡可能是两个重要的原因。一般说来,简单地用增加模型节点数目的方法可以提高精度。然而,有一个更重要的动向是,使用细网格的三维模型来最大限度地减小或消除诸如拟函数的工程近似,减少节点数目。从内部应用情况来看,1975年,使用三维模型的研究工作只占25%,而到1982年左右,这一比例几乎增加到50%。近来的大部分研究工作均以不同的形式应用三维模型。这一倾向也可在其他工业部门中见到。

第二个因素涉及计算费用和人工费用的比例。应用拟函数的模型比不用拟函数的模型要花费更多的人工劳动。自1980年以来,专业工程的人工劳务费用估计大约增加了20%。在同一期间,计算费用减少了大约一个数量级。如此看来,在油藏工程应用中,把侧重点转向更多的计算量方向,这是一个合乎逻辑的发展。

然而,即使计算技术发展了,仍还有一些情况不能简单地靠增加节点数目获得合理的回答。用“全油田”模型来模拟一个大的、地质上复杂的油藏仍然是不现实的。例如,像大庆(中国)那样的一个油田,有10000多口井,并且地质沉积非常复杂⁽¹⁾,在设计降压决策时,应用全油田模拟未必是永远经济有效的,在这种情况下,其他方法可能将更为适用些。

本文目的是描述复杂油藏动态分析中可能使用的模拟方法。在下面讨论中,“复杂油藏”是指这样的流体流动系统,在这种系统中,如果不用工程近似方法来描述基本驱替机理或油藏非均质性,那么,模拟所需的节点数将非常之大,以致达到实际上不可能的地步。

以后的部分,将涉及一系列课题。首先,给出模型类型的定义,随后讨论拟相对渗透率的某些概念。讨论的目的不是为了发展基本的拟函数技术,而是要把这个概念推广到模拟大型复杂油田时所遇到的情形中去。这里假设读者已具有拟函数原理的知识。其次,主要是讨论数据考虑、一般的网格剖分的指南和研究的目标。最后提供一些应用技术方面的实例。

模型分类

全油田模型

全油田模型的定义,严格地说来,包括全油田范围内互相连通的孔隙体积。它涉及的水域应该包括在初始网格系统中或者用外部定义的边界条件来加以描述。全油田模型决定于很多因素(如包括地质上的复杂性),这种模型可能是一维、二维或三维的模型。

过去,平面模型曾是分析全油田动态的主要工具。虽然它们在分析油藏动态方面,依然占有一定位置,然而三维模型,由于它的简化假设较少,计算成本较低以及其他诸如信任程度等原因,因而应用更为广泛。应用平面模型则要求工程师去创造、评选和使用拟函数,仅个别情况例外。

设计全油田模型有许多方法。油田大小、采油机理、井数和地质沉积都是影响这一设计的因素。对于一个较小的均质油田来说,有可能形成一个界限十分明确的网格系统,既能正确考虑控制驱替机理(井底效应除外),又不必应用诸如节点间的拟相对渗透率等特殊函数。然而,在大多数情况下,由于表示油田的节点步长太大,故有必要应用上述特殊函数来正确地考虑流动动态。

如果初始网格系统未包括全部连通孔隙体积,则使用各种方法来建立模型边界上的边界条件。例如油藏被水包围的情况就是一个例子。通常稀网格模型(它包括整个含水系统和其他互相连通的油气藏)与特殊油藏模型相互配合使用。根据稀网格模型可估算出流体通过边界的运动情况(见图1)。这一过程可用人工或特殊软件完成^[2]。另外一个正在普及的方法称为局部网格加密法^[3,4]。用这种方法把加密网格嵌入稀网格内(见图2),并对这种联合的模型联立求解。

分节模型

分节模型(见图3)对分析油藏动态可能是很有用的。在井的周围进行适当的网格剖分,形成一种网格系统,这种类型的模型可用于研究锥进和突进动态、井位和完井决策、以及设计油田生产剖面。应用这种模型的主要困难在于在模型边缘上建立反映实际的边界条件。对于一个性质均匀的油田,为了重现井网开发的过程,用封闭边界可能是合适的。在其他情况下,模型边缘外的压力边界条件可以合理地表示一个单元外所发生的情况。在大多数情况下,使用这种类型模型时,选择边界条件将是最关键也是最困难的一步。

剖面模型

剖面模型代表油藏的一个垂向断面。在剖面模型中,将油层的厚度分成许多层,它们的

边界通常与地质边界相一致。通常认定每一个地质层具有一个以上的模型层（见图4a）。这种模型通常可精确地计算出油藏内部流体和压力分布（远离井处而非邻近井处）。这种模型在线性流动（就平面意义上说）情况下可以采用等宽度节点，也可以在考虑液体流速改变时采用不同宽度的节点（图4b,c）。

用于估计油井动态的特殊剖面模型是单井柱状剖面模型（见图4d）。井筒附近用细分网格对重力和粘滞力提供了精细的描述。使用这种类型模型可以逼真地反映单井动态。

剖面模型主要用来进行机理研究，和生成拟函数及井函数，从而为大模型的应用作好准备。在某些流动状况下，这些模型也可用来进行完井井段的决策研究。

罐 模 型

罐模型可以认为是“零维模型”或“单节点模型”。这种模型可计算出任何方向内流体的速度。如流体分离这样最简单的概念，可以合并在这种模型中，并且经常以近似的形式出现。由于这些简化的假设，罐模型在研究复杂流动时没有太大的价值。实际上，罐模型的应用正在减少，甚至在简单流动情况下也很少应用。简单的多维模型，将会经济有效地产生更为令人信服的结果。

拟 饱 和 度 函 数

相对渗透率和毛管压力概念，是油藏动态研究中的一个重要部分。由于发展了可以应用于宏观问题的拟饱和度函数，这些概念的含意更扩大了。在理想系统中，拟函数有其牢固的数学基础，合理地使用它，将会得到某一饱和度分布，此分布代表更加详细分布的总体平均值。

后续讨论的目的不是要发展使用拟函数的基础，而是根据油藏工程应用的经验对拟函数的一般使用情况作一些评述。关于生成拟函数的技术细节已有很好的文章^[5]可供参考。

生成和使用拟相对渗透率函数是许多全油田模拟的重要组成部分。几乎所有的平面模型都需要拟函数，这点和很多三维模型是一样的。是否需要三维模型决定于层厚。应用三维模型中，拟函数通常称之为“块”拟函数。关于它们的生成和应用的补充细节，在本节的后面将加以描述。

从历史上看，考虑到稀网格引起的不精确性，因而拟函数作为一种近似方法而为工业界所采用。拟函数最初的发展是基于垂直平衡概念^[6]。然而，为了适应于更广泛的范围，后来提出了很多更为精确的内容。拟函数的应用已扩展到包括流动动态以及流动/油藏描述的相互作用。而目前在这些方面仅有一些薄弱的理论基础。众所周知，拟函数与油藏描述、速度、原始饱和度分布、流动方向和其他变数有关。虽然最初发展它们是为了通过降低维数来节省计算费用，同时也是作为控制平面数值弥散的一种手段^[7]。当以这种方式应用时，对它们的生成和应用必须格外谨慎。

图5所示的简单理想化剖面模型，可用来解释同拟函数的生成和实施有关的一些困难问题。剖面模型是一种常用模型，利用它产生三维稀疏网格模型中使用的拟函数。剖面包括油带、部分连通水域和气顶。实线表示的网格系统是剖面上网格的剖分；虚线表示粗网格三维模型中的子块。油藏开发设计规定，在油田开发早期，将所产生的气体注入气顶，使气顶膨胀。随后注水并停止注气，这样就引起气油接触面的倒流。基于这种简化的描述，能够提出

几种意见。首先,对稀网格中已给定的平均饱和度,在三个指定的单元边界上,存在着不同饱和度的分布。因此,不论应用那种方法生成拟函数,都应承认对一个平均饱和度均有三个不同的潜在分流特征。第二,若把拟函数用于降低弥散,那么流动特性将不仅是各向异性(x 方向与 y 方向不同),而且还有双方向的各向异性($+x$ 方向与 $-x$ 方向不同)。之所以提出需要双向性,是因为在导出控制弥散的拟函数时,仅用了粗网格上游边界上细网格柱上的网格单元来计算拟相对渗透率曲线。这样,当气-油接触面运动倒向时,单元的流出面突然变化,故同一平均饱和度需要两个不同的关系。

倘若饱和度滞后函数是很重要的,那么问题就会进一步复杂化。在此情况下可以想象到,无论排驱还是吸入,双向拟函数都是需要的。然而,生成拟函数以反映存在滞后关系的复杂作用的技术,目前尚未建立起来,至少已发表的文献中尚未提到此问题。不言而喻,若企图作出用于滞后的拟函数,必将用细网格模型进行详尽的试验。

一般的资料考虑

不论对复杂的还是简单的油田,模型构造都应与有效的油藏描述数据相一致。描述数据的数量通常与油田开发阶段有关。在油田开发中期,可能有广泛的地质研究成果可用于指导原始模型的发展。还会有井的动态数据可用来深化历史拟合阶段中的油藏描述。

另一方面,在开发前或在筛选研究阶段,通常油藏数据只包括地震资料、气/油或水/油接触面信息、以一口井的电测或试井结果为基础的分层和饱和度数据。特殊岩心分析资料可能完全没有得到。在这种情况下,第一个印象可能是完全不能编制一个数值模型,而宁愿用简单物质平衡或罐模型来回答问题。决定使用哪一种模拟方法应该根据所研究的目标而定。假如所提出的问题能用物质平衡法来回答,那么,这或许是最合适的方法。然而,在很多情况下,简化的物质平衡模型不可能实现所研究的目标,那么数值模型就成为更合适的了。编制数值模型的最初动机并不是为了描述油藏性质的空间变化,而是为了求解控制流体在油藏中的流动方程,注意到这点是很重要的。“缺乏资料”常常成为不去编制多维数值模型的一个理由。倘若描述机理是研究目标中的一部分,那么,即便油藏是非均质的,或者可以用均质来描述,多维模型仍然可能是最合适的方法。当计划一项研究时,很重要的是不要把缺少特殊描述资料与需要了解驱替机理对油藏开采动态的潜在影响相混淆。

由于拥有的油藏信息是有限的,数值模型的主要价值之一可能是利用它可估计出某些对油藏描述不确定性比较敏感的某些问题。换句话说,模拟就是要回答,“假如这样,将会怎样”这一类问题,如“若残余油低于首次岩心试验的结果会怎样”,或“若测井中看到的页岩不密封怎样”,或“底水驱替比预计要强将会怎样”,或“稀井网的效果将会怎样”以及其他很多问题。这种类型的问题,通常是不能用物质平衡法回答的。然而,对这些问题的回答,可能影响下一步井位或钻井平台位置,指导气和水处理设施投资的决定,帮助定量地提出需要补充录取的资料,甚至可以指导有关放弃开发的决策。

室内试验表明,过去用物质平衡模型进行油藏评价,而现在用数值模型可经济有效地实现。模型的构造简单,运转费用又不太高,这首先是因为硬件和软件现代化的缘故。例如,一般市场上有效的软件和用机时间的费用,在一个5000节点的三维模型上,一个20年历史水驱的设计,其用机时间的费用可能为100—150美元。和相应的专业人工劳务费相比,最多相

当于几小时的劳务费。

网格剖分考虑

不论那种模型，选择井网剖分取决于很多因素，其中包括研究的目的、地质复杂性，以及在一定程度上取决于硬软件的限制。地质分层通常用来指导选择垂向剖分。若所设计的是一个剖面模型或一个三维模型，其中没有采用拟函数，那么，在同一地质层中可能存在几个层，其中每个地质层段取决于层段的厚度。不论那种情况，垂向剖分必须足够细，以便能够充分描述油藏开发期间出现的饱和度及压力分布。不论是在油藏边界，还是在页岩邻近处，假如气体在上面运动，水在下面运动的情况发生的话，在这些区域内加密网格是很必要的。用步长5到10英尺（1.5到3米）厚来表示这种现象可能还是必须的。在任何情况下，在最后选择网格之前，应作进一步校核，看看进一步细分层对回答结果有无本质变化。

为井位研究所设计的三维分节模型或用来生成突进/锥进井函数的三维分节模型，在这种三维分节模型中，平面网格界限也是很重要的。若突进见水时间很重要，则获得的结果大概对网格是否沿走向划分是很敏感的。若见水后动态的定量化是研究的目标，那么获得的结果对网格是否沿倾角划分也将是很敏感的。倘若突进和锥进同时都是考虑的因素，则结果对所有三维中的网格将会都是敏感的。室内试验表明，为了对突进/锥进进行研究，平面上近井处的网格步长20到40英尺（6到12米）是合理的尺寸。当然，步长的选择不是一个独立的问题，并且总是要通过进一步加密步长来检验所得到的答案。

选择全油田模型中的平面网格步长，通常要照顾各方面的要求，特别是当油田井数很多的情况更是如此。在注入井和生产井之间，通常是希望有两个或两个以上的节点。然而，主要视垂向网格剖分而定，上述做法有可能导致模型尺寸过大。假如采取一种妥协的办法，即相对于井距增加平面节点，那么，有限面积的分节模型应该用来检查和定量确定数值弥散及扫油效率。对全油田模拟结果的一些调整，都是根据分节模型结果做出的。

研究的目标、收益和价格

在开始建立任何模型之前，研究的目标应该限定在最特殊的课题上。在那些潜在模型尺寸可能接近硬软件极限的大油田或复杂油田，这一点是尤为正确的。

表1列出了油藏研究中可能提出的具有代表性的目标。此表显然不是很详细的，在这里所提供的只是经常遇到对模型设计有影响的问题。从表中还可清楚地看出，所提出的研究目标并不都是严格的技术问题。假如目的是为了达到最大的技术上可信程度，在这时，模型可能会过于复杂。

价格和收益分析，应作为每项设计研究的一部分来进行。倘若所增加的潜在收益远大于研究费用，并且用其他方法不能定量回答问题，则此时应用于油藏的模型研究是最有利的。一个小油田，在最佳和次佳方案之间的采出量和工作费用的差别，不可能足以支付复杂油藏研究的费用。反之，假如油藏储量和投资都很大，而研究将导致增加采油量或减少花费，那怕它们只占很小的百分数，那么这种研究即使很贵也是很值得的。例如，从方案中取消一口井，就足以支付很多项的研究费用。

表 1 典型的研究目的

1. 对不同方案设计预测油田的生产轮廓;
2. 确定采收率对油藏描述变化的敏感度;
3. 定量确定井距对水驱采收率的影响;
4. 确定气驱和水驱效率;
5. 定量描述突进和锥进动态;
6. 完井井段的决策评价;
7. 选择注水方式;
8. 确定提高采收率的潜在能力;
9. 租赁线排油量的定量化;
10. 管理机构对开发设计的支持。

应用实例

分节模型

图6所示的理想油藏的开发,包括早期的气顶膨胀生产,随后沿油藏走向进行面积注水。这样,开发初期流体向下倾方向运动,注水期间沿走向运动。在作出最后开发决策之前,编制一个分节模型,用于选择注水方式。选用这个方法是因为砂体性质十分均匀,而且采用面积注水开发提供了对称驱油的条件。

在早期探索性研究中,有些研究旨在发展平面模型。拟函数是沿油藏倾斜的剖面而生成的,其目的是为了描述气顶膨胀阶段的动态。注水期间,为了考虑水在垂直于初始流动的方向上在重力作用下的下沉,应用各向异性拟函数可能是必要的,这一点已得到公认。编制简单的有限面积细分网格三维模型是作为产生拟函数的基础和评价平面模型的方法。经过有限的试验后认识到,虽然在平面模型中用各向异性拟函数技术是可能的,然而校正和试验却使这种方法成为不现实。在探索性研究的基础上,为了证实岩石相对渗透率曲线应用的可行性,选择了在纵向上充分定界的三维分节模型。

提出的这个例子说明了应用拟函数不是经济有效的。幸运的是,油田几何形状和开发设计都适合应用分节模型方法。

井锥函数

对大多数油田来说,建立一个具有足够细网格的单一模型,来描述各井周围的饱和度及压力分布不是切实可行的。因此,大多数全油田模型,不论是平面的或是三维的,都要利用某种外部生成的函数将井的动态输入到油田设计的粗网格模型中。通常形成单井动态基础的或者是一种单井柱状模型,或者是一种细网格三维突进/锥进模型。

事实证明,使用粗网格三维油田模型描述锥进效应是一种有用的方法,这种方法是各向异性相对渗透率为基础而形成的。图7所说明的粗网格系统可用来设计全油田的动态。在井钻穿的柱状剖面中,发展特殊的垂直相对渗透率,以加速水向上运动而进入射孔节点。单井柱状模型可用来发展井函数和验证模型井动态的基础。在这一特殊情况下,粗网格三维模型中

的垂向粘滞力与岩石毛细管压力为水的向上运动提供了足够的势能梯度。在另一些情况下，需要利用参考文献8所描述的修改后的毛细管压力关系式，为水的向上运动提供驱动力。

突进/锥进函数

在倾斜油藏中，突进和锥进都可能是提供单井动态的重要机理。要再次强调的是，设计一个全油田模型或者甚至设计一个具有足够密网格剖分多井分节模型来考虑突进和锥进的机理，一般来讲是不现实的，由于不对称性，单井柱状模型对生成井函数是不适宜的。宁可用图3所示的这种类型的模型更为合适些。

突进/锥进函数通常是难以生成的，因为它们依赖于横向和垂向饱和度及压力梯度。因此，网格系统设计必须包括井筒附近各个方向上对网格加密。

生成函数的一种方法是把某种生产特征诸如气/油比或水/油比与某一体积内的平均饱和度建立关系，而所谓某一体积是指相应于粗网格系统中的源节点的体积。此外，利用气体突进作为一个例子，在粗网格上离生产井柱上游端一个或两个节点处监测气体饱和度，为了探测气/油接触面的推进，这可能是很必要的。这种需要取决于与粗网格模型步长尺寸有关的突进势能的大小。

假定生产特征与速度、平均饱和度以及距离接触面的距离等变数之间的对比关系可以得到一个满意的结果，但要在粗网格模型中实现这种关系却不容易做到。例如，这个关系可能预测出会产出自由气，但在井点网格中却可能没有自由气。在这种情况下，一种方法是不涉及气源，因为这个关系控制了气体产量，并且为了满足对比关系的需要，从气顶中把气体排除去。虽然这个方法是不完全严格的，但如果气相中的压力梯度较低，那么这种方法仍可产生精确的结果。在细网格模型上的试验，肯定了这一方法的效果。当然，每一次特殊应用时，都要对这个方法的适应性进行试验。

井 位

对于一个轮圈形油藏，构造顶部的井位分布以及气/油和水/油接触面的位置，通常会影响到一口井中得到的最终采收率。在此情形下，钻井目标普遍用相对于接触面的位置来表示，倘若错过了钻井目标，或者假如构造顶部是被钻在一个所不希望的深度的话，那么，为达到原来的目标钻一口侧向跟踪井是否必要这类问题可能被提出来。从三维分节模型（在一般的目标区域内进行了网格加密）中通常可以得到回答这种问题的指导。图8表示为一种可能的剖面模型。假定一口生产井可能有几个可供选择的位置，而模型运行到相对应的情况下停止。对不同井位下所得到的采油量进行对比，有助于确定侧向跟踪井的经济效益。

总 结

近些年来，随着硬软件的发展，数值模拟的应用重点已经转移。在合理的经济条件下，运用大模型的可能性为油田动态分析人员提供了宽广的工作领域。在一些应用中，较少地信赖象拟函数那样的工程近似方法，实际上可以降低研究费用，并且可以及时地提供结果而产生更确切的答案。另一方面，编制更大的全油田模型的能力可以使得油田动态设计更加可靠。

然而, 单靠大模型不可能对所有的油藏工程问题都提供答案。由于一些油田太复杂, 以致不能应用细分的全油田模型。因此, 象拟函数这样的近似方法, 在油藏动态分析中将继续占有一定的位置。今后, 为了包括更加复杂的流体流动动态, 很可能还要进行一些研究, 以扩大拟函数的用途。

分节模型分析方法的应用, 可能将日益受到注意。这种方法在机理研究指导油田开发决策, 以及在全油田模拟中为建立反映实际的井动态提供基础等方面都是很有用的。

分析和设计大而复杂油田的动态与简单的应用是大同小异的。关键性的一步是确定具体的研究目标。选择一种经济有效的模拟方法时, 不仅要考虑同研究的目标相一致, 还要考虑到同现有的资料和分析工具相适应。

参 考 文 献

1. Wang, D. and Chaoyin, C.: "Separate Production Techniques for Multiple Zones in Daqing Oil Field," J. Pet. Tech. (Aug. 1983) 1521-1529.
2. Graham, M. F. and Smart, G. T.: "Reservoir Simulator Employing a Fine-grid Model Nested in a Coarse-grid Model," paper SPE 9372 presented at the 1980 SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, September 21-24, 1980.
3. King, J. W., Naccache, P. F., Nicholas, M. O., Pollard, R. K., Ponting, D. K., and Rae, J.: "The Use of Non Neighbour Grid Connections in Reservoir Simulation," EUR 281, European Petroleum Conference, London 1982.
4. Heinemann, Z. E., Gerken, G. and von Hantelmann, G.: "Using Local Grid Refinement in a Multiple Application Reservoir Simulator, paper SPE 12255 presented at the Seventh SPE Symposium on Reservoir Simulation, San Francisco, 1983.
5. Aziz, K. and Settari, A.: Petroleum Reservoir Simulation, Applied Science Publishers Ltd., London (1979).
6. Coats, K. H., Dempsey, J. R. and Henderson, J. H.: "The Use of Vertical Equilibrium in Two-Dimensional Simulation of Three-Dimensional Reservoir Performance", Soc. Pet. Eng. J. (March, 1971), 63.
7. Kyte, J. R. and Berry, O. W.: "New Pseudo Functions to Control Numerical Dispersion", Soc. Pet. Eng. J., (August, 1975), 269.
8. Woods, E. G. and Khurana, A. K.: "Pseudofunctions for Water Coning in a Three Dimensional Reservoir Simulator," Soc. Pet. Eng. J., 17, No. 4, pp. 251-62.

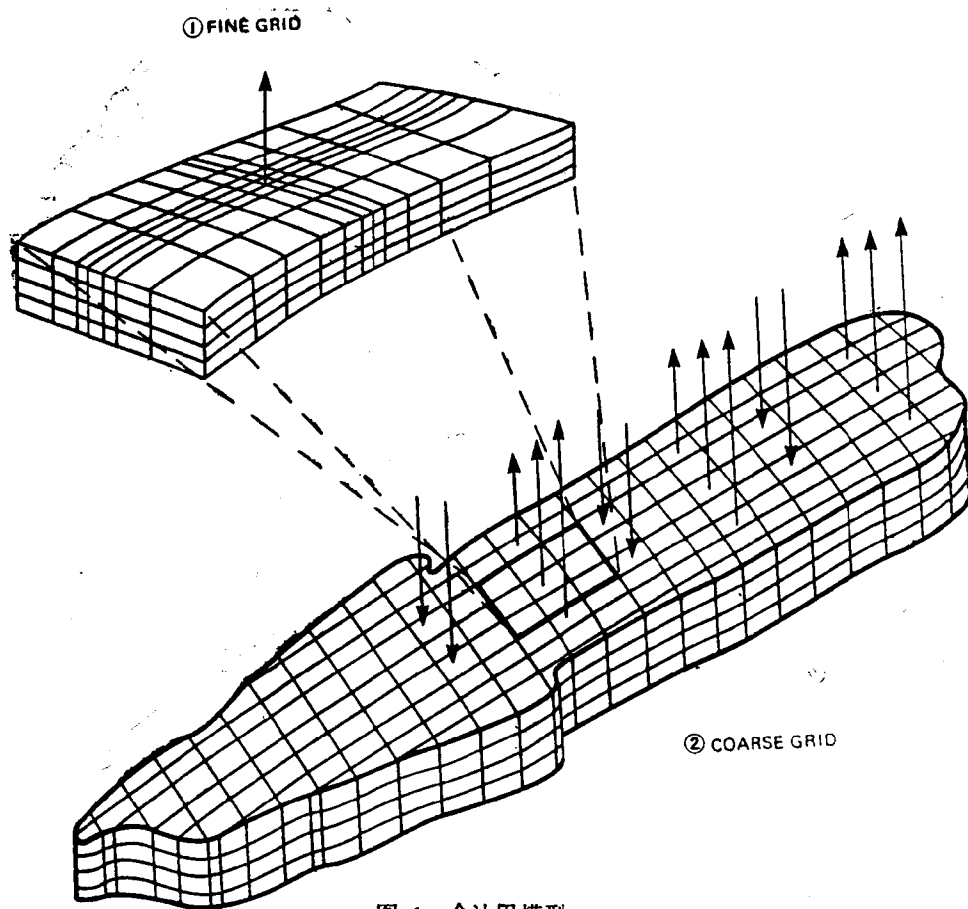


图 1 全油田模型
①细网格；②粗网格

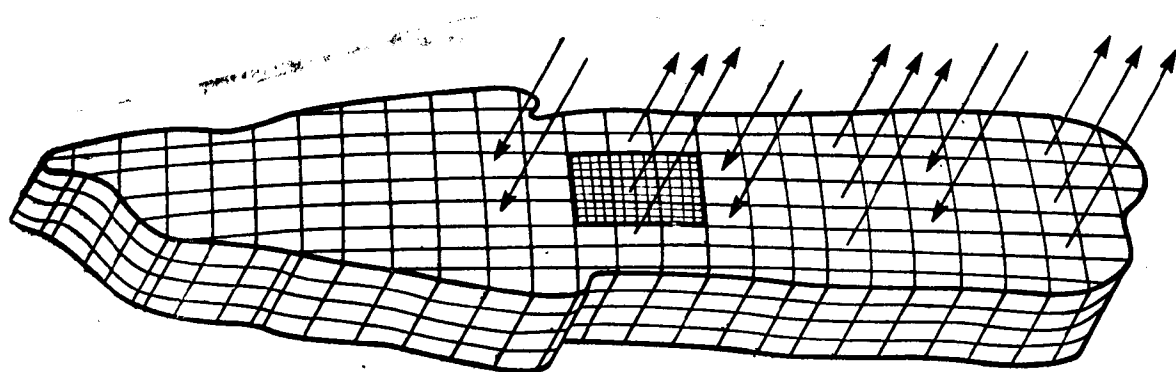


图 2 模型局部网格加密

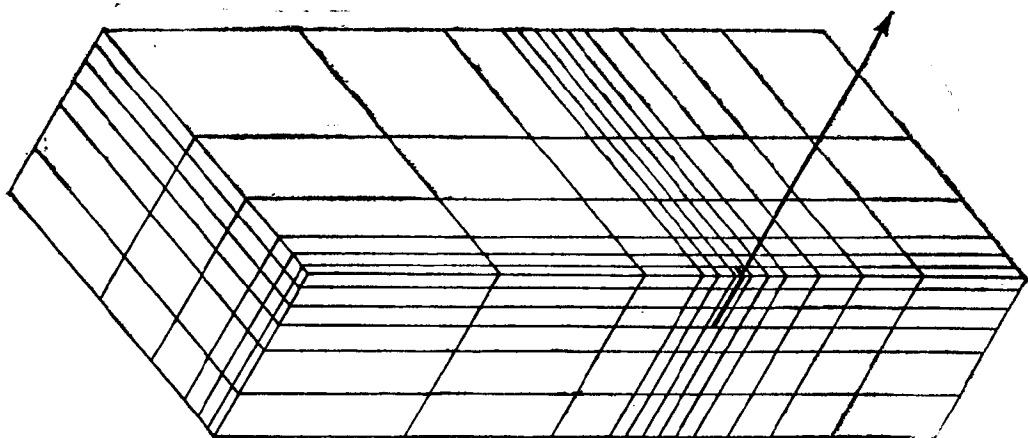


图 3 分节模型

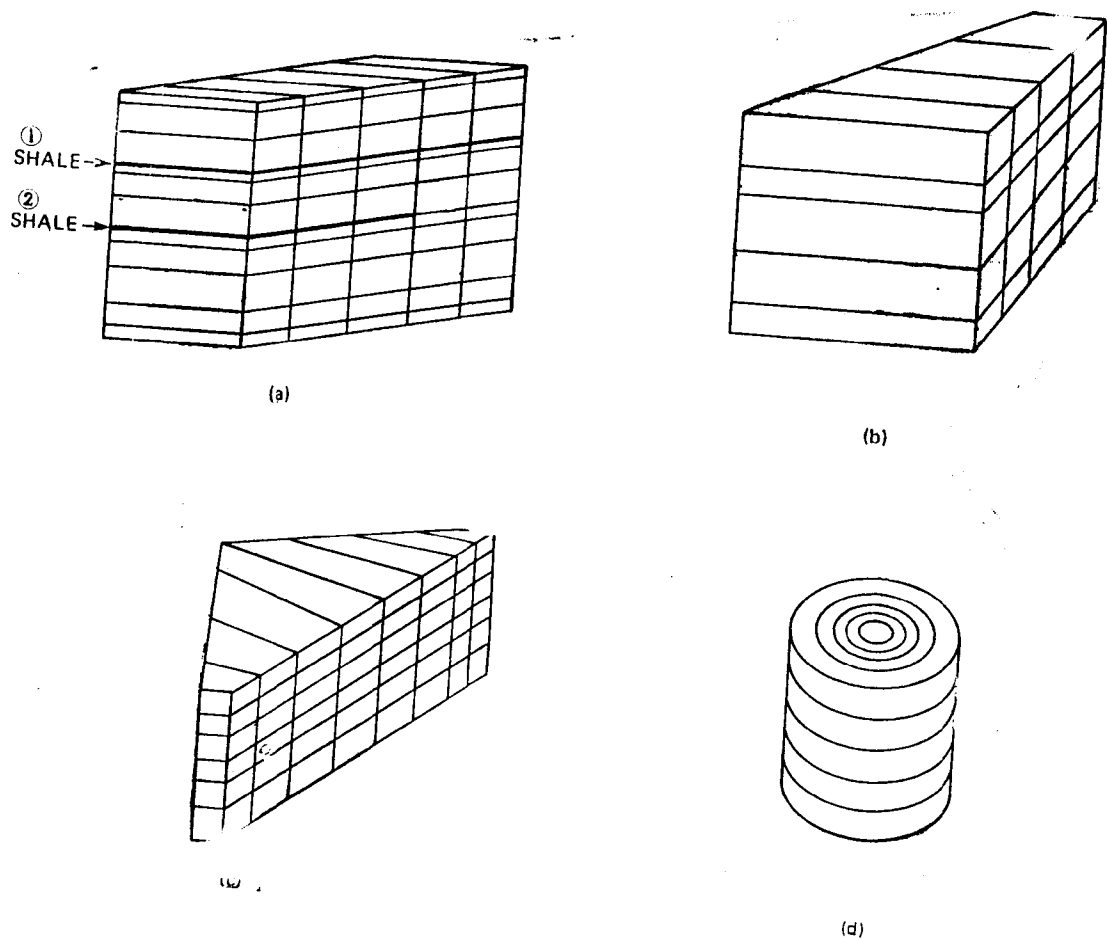


图 4 剖面模型
①页岩; ②页岩

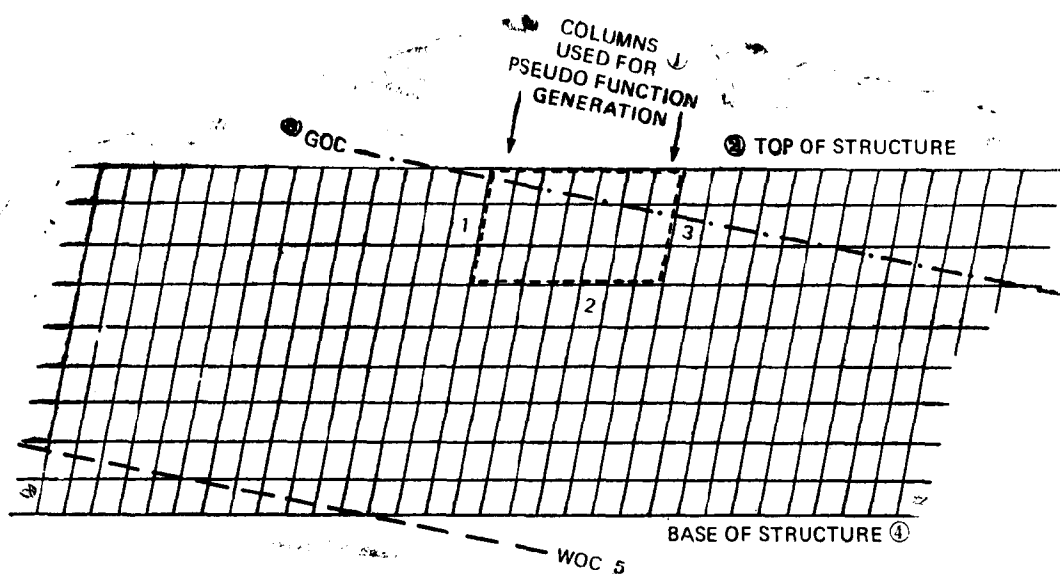


图 5 拟函数生成

①为生成拟函数所用的柱状剖面；②构造顶部；③油气界面；④构造底部；⑤油水界面

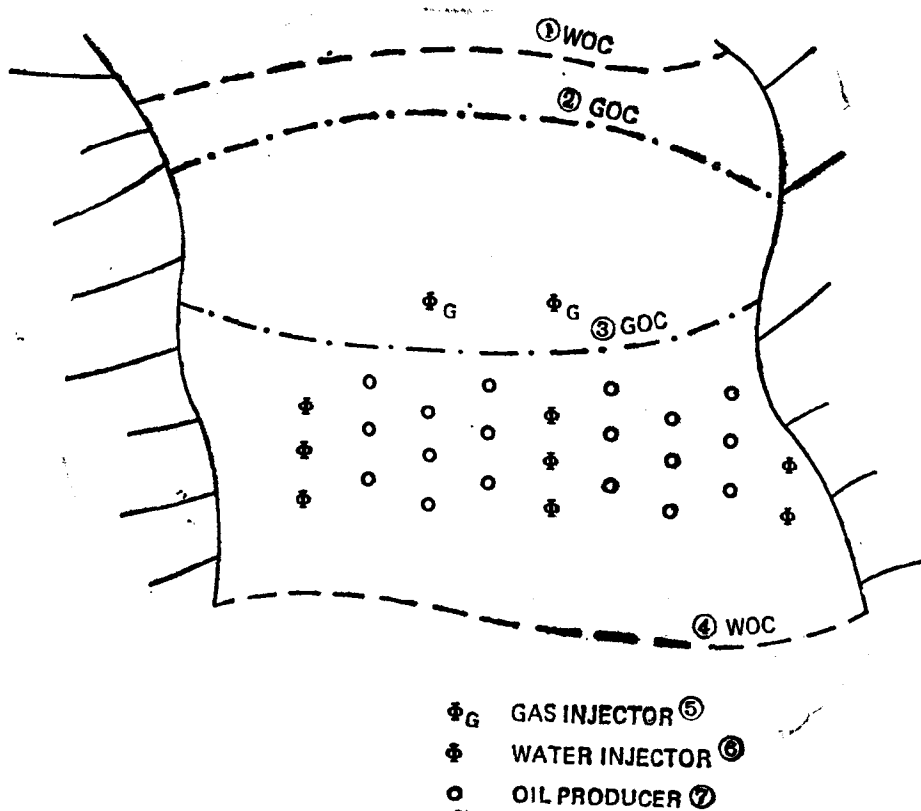


图 6 油田开发设计图

①、④油水界面；②、③油气界面；⑤注气井；⑥注水井；⑦生产井

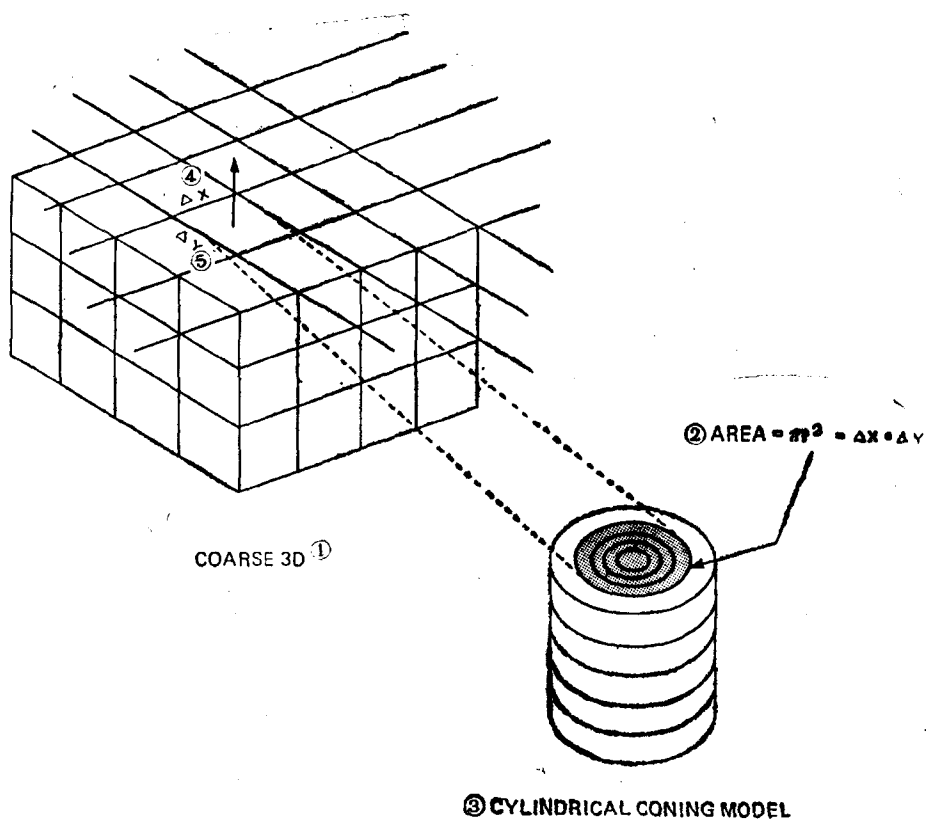


图7 单井锥进模型

②粗网格三维模型；②面积；③柱状锥进模型；④、⑤增量

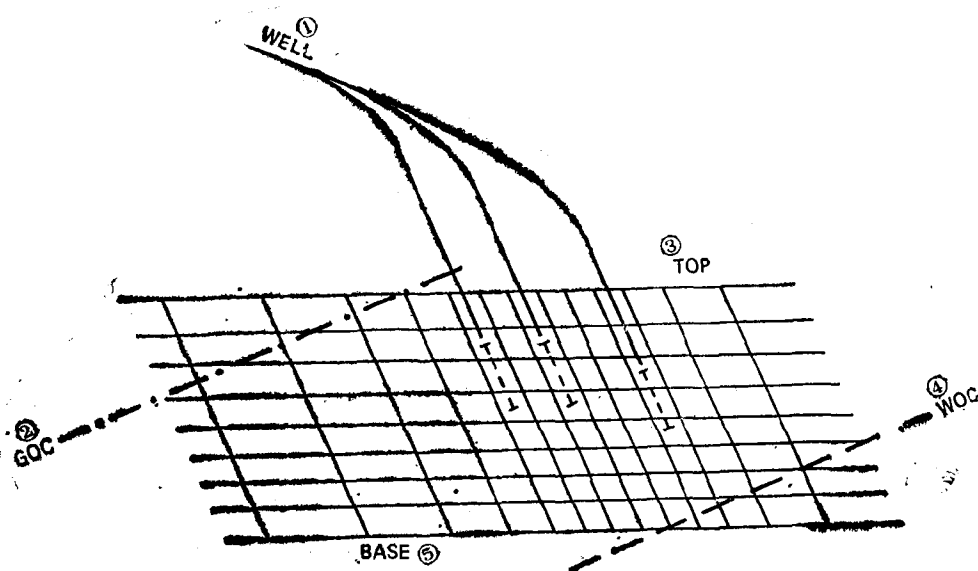


图8 井位图

①井；②油气界面；③顶部；④油水界面；⑤底部