

YOUQI CHUCENG YANJIU JISHU

# 油气储层研究技术

陈丽华 王家华 李应暹 田崇鲁 等编著

石油工业出版社



# 油气储层研究技术

陈丽华 王家华 李应暹 田崇鲁 等编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书分两篇展示了先进的储层研究技术与方法。第一篇“储层定量评价和计算机模拟”从量化角度对储层的成因性质和空间展布规律进行了描述、评价和模拟,吸收国内外先进的技术方法,结合我国油气田具体情况,运用计算机模拟,探索了新的储层定量研究方法。第二篇“实验测试技术”在储层地球化学、微束及微区分析配套、图像处理、包裹体测试、分形几何学、激光显微取样、核磁共振等方面完善并建立了新的实验技术和方法。

本书可供广大沉积学、石油勘探开发科技工作者和有关高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

油气储层研究技术/陈丽华等编著.  
北京:石油工业出版社,2000.6  
ISBN 7-5021-2875-1

- I. 油…
- II. 陈…
- III. 储集层-研究方法
- IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 72141 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排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 8 插页 439 千字 印 1—1000  
2000 年 6 月北京第 1 版 2000 年 6 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5021-2875-1/TE·2242  
定价: 35.00 元

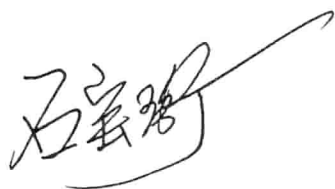
## 序

我国油气勘探开发事业经历了 50 年的光辉历程。在国民经济建设的各个历史阶段，中国石油天然气总公司以提高油气勘探效益和提高油田采收率为目标，制订科技发展规划，提出重大科研项目，组织广大科技人员开展研究。

80 年代以来，随着油气勘探开发程度的提高，作为油气赋存的储层，被发现的类型愈来愈多，内部结构十分复杂，生产上对储层的认识提出更高的要求。因此，中国石油天然气总公司作出在“七五”、“八五”期间开展“全国油气储层评价”研究的决策。强调指出：油气储层研究要有中国特色，要从勘探到开发，从宏观到微观，从理论到技术方法，全面、系统并有重点地展开。10 多年来，先后有 500 多位科技工作者参加到全国油气储层评价研究行列中，紧密结合生产实际，有针对性地解决了生产中的一些难题，取得了丰硕的研究成果。

中国石油天然气总公司十分重视研究成果的总结和推广应用。先后组织出版了多部油气储层研究专著，如《油气储层评价技术》、《中国油气储层研究图集》、《中国陆相油气储层》和一系列油气储层科技丛书及论文集。这些专著和文集凝聚了许多储层研究专家的心血，是实践经验的总结，是认识的精华。它们的出版标志着我国油气储层研究水平达到一个新的阶段。它们深受读者欢迎，在石油科技界产生重要影响。其中，有的专著已有英译本出版，并获得国外同行的普遍好评。《油气储层研究技术》一书是储层评价研究系列丛书中的一种，它着重反映储层研究中应用的若干新技术、新方法。主要包括储层随机建模方法研究、湖盆三角洲沉积过程的数值模拟、储层裂缝定量模拟、油气储层综合评价系统等储层定量评价和计算机模拟技术；储层地球化学、微束及微区分析配套、图像处理技术、包裹体测试、激光显微取样、分形几何学和核磁共振等新的实验技术方法。

随着更多新技术、新方法的开发和应用，储层研究将会提高到一个新水平，并更有力地指导油气勘探与开发取得更加明显的经济和社会效益。



2000 年 1 月

# 前 言

中国石油工业以陆相石油地质理论和陆相沉积盆地产油著称于世，陆相沉积盆地产油则主要是对陆相油气储层的认识、评价及一套相应对其改造的技术和方法。

中国石油天然气总公司从80年代中期开始，由科技发展局直接领导，在全系统组织了500多名科技人员开展了“中国油气储层研究”的科技攻关。通过近十年攻关系统研究，建立了单井储层评价、区域储层评价、开发储层评价、储层敏感性评价和储层动态评价等五项评价技术方法和规范，建立并推广了储层实验测试技术。在课题结束时，组织了一部分专家对中国陆相碎屑岩储层及碳酸盐岩储层进行了理论总结，对油气储层研究技术进行了归纳与提炼。因而“油气储层评价技术”就是“中国油气储层研究”的总结成果之一。

“油气储层评价技术”展示了先进的储层研究手段，同时与飞速发展的高科技接轨。第一篇“储层定量评价和计算机模拟”从定量化角度对储层的成因性质和空间展布规律进行了描述、评价和模拟，吸收国内外先进的技术方法，结合我国油气田具体情况，运用电子计算机这一有力的工具，经过大量艰苦、细致的工作，探索出一些新的储层定量研究方法；第二篇“实验测试技术”跟踪国外储层实验新技术、新方法，在储层地球化学、微束及微区分析配套、图像处理技术、包裹体测试、分形几何学、激光显微取样技术、核磁共振技术等方面完善并建立了新的实验技术与方法。

第一篇“储层定量评价和计算机模拟”，第一章由王家华、张团峰编写，第二章由马立桥、周书欣、耿忠霞编写，第三章由李应暹编写，第四章由田崇鲁、曾联波编写，曲政参加了全篇的统编工作；第二篇“实验技术”由陈丽华统编，第一章由程中第、马亭、柳常青编写，第二章由张连雪、陈丽华编写，第三章由刘鑫编写，第四章由贾芬淑、王城辉编写，第五章由何锦发、包书景、周文宝编写，第六章由魏宝和周文宝编写，第七章由强子同、刘道清、刘辉编写，第八章由王为民、陈权编写。

本书编写过程中得到了中国石油天然气总公司科技发展局石宝珩同志，中国油气储层协调小组裘亦楠、薛叔浩、应凤祥教授的关心与指导，在此一并感谢。

“油气储层研究技术”编写小组

1999年12月

# 目 录

## 第一篇 储层定量评价和计算机模拟

第一章 储层随机建模方法研究	( 1 )
第一节 随机模拟的基本原理	( 1 )
第二节 随机建模和随机模拟用于储层表征的若干方法	( 7 )
第三节 储层随机模拟方法	( 14 )
第四节 实例分析	( 24 )
第二章 湖盆三角洲沉积过程的数值模拟	( 32 )
第一节 概述	( 32 )
第二节 三角洲形成演化概念模型的建立	( 33 )
第三节 三角洲形成演化数学模型的建立	( 35 )
第四节 模拟预测应用实例	( 39 )
第五节 区域储层预测	( 48 )
第三章 油气储层综合评价系统	( 51 )
第一节 灰色理论测井储层精细评价解释系统	( 51 )
第二节 地震储层评价系统	( 73 )
第三节 碎屑沉积物模拟系统	( 84 )
第四章 储层裂缝定量模拟技术	( 102 )
第一节 概述	( 102 )
第二节 储层构造裂缝特征描述	( 105 )
第三节 储层裂缝数值模拟技术	( 115 )
第四节 储层裂缝的分布与影响因素分析	( 125 )
参考文献	( 131 )

## 第二篇 实验测试技术

第一章 油田水及干酪根水热降解液中低碳有机酸的测试方法及应用	( 136 )
第一节 短链有机酸的地球化学意义	( 136 )
第二节 低碳有机酸的测定方法现状	( 138 )
第三节 低碳有机酸测定的地质应用	( 155 )
第二章 显微图像处理技术在储层研究中的应用	( 167 )
第一节 扫描电镜图像处理技术	( 167 )
第二节 荧光图像处理技术	( 170 )
第三章 碳酸盐岩矿物流体包裹体研究	( 176 )
第一节 矿物流体包裹体的主要类型及其地质意义	( 176 )
第二节 流体包裹体测试流程及主要研究方法	( 178 )

第三节	盐水包裹体及其在储层地质研究中的应用·····	(185)
第四节	有机包裹体及其在油气勘探中的应用·····	(188)
<b>第四章</b>	<b>分形几何学在孔隙结构描述中的应用·····</b>	<b>(198)</b>
第一节	分形几何学基本概念·····	(198)
第二节	砂岩铸体薄片上分形孔隙结构及分形维数测定方法·····	(200)
第三节	压汞毛管压力曲线研究砂岩孔隙结构的分形特征·····	(202)
第四节	岩石分形的 SEM 特征体半自动测试 ·····	(204)
<b>第五章</b>	<b>能谱有标样定量分析方法—测定自生矿物成分·····</b>	<b>(207)</b>
第一节	能谱有标样定量分析的原理和流程·····	(207)
第二节	仪器工作条件的选择·····	(208)
第三节	能谱有标样定量分析软件·····	(209)
第四节	能谱有标样定量分析结果的准确度及误差分析·····	(210)
第五节	能谱有标样定量分析方法在油气储层研究中的应用·····	(212)
<b>第六章</b>	<b>冷冻干燥技术及其应用·····</b>	<b>(225)</b>
第一节	冷冻干燥技术·····	(225)
第二节	样品的扫描定位分析及不镀膜分析·····	(227)
第三节	分析样品特点及实验条件的选择·····	(228)
第四节	扫描电镜分析冷冻干燥的样品·····	(228)
第五节	结论·····	(231)
<b>第七章</b>	<b>激光显微取样稳定同位素分析·····</b>	<b>(232)</b>
第一节	实验装置·····	(232)
第二节	实验结果·····	(234)
第三节	结论·····	(239)
<b>第八章</b>	<b>核磁共振成像技术在储层研究中的应用·····</b>	<b>(240)</b>
第一节	核磁共振成像/谱系统结构及样品制备 ·····	(240)
第二节	核磁共振成像基本原理·····	(242)
第三节	储层岩心中流体的弛豫和分子自扩散·····	(247)
第四节	利用核磁共振成像技术进行岩心分析·····	(250)
第五节	核磁共振成像技术研究储层渗流动态过程·····	(256)
	参考文献·····	(265)
	<b>图版说明·····</b>	<b>(270)</b>

# 第一篇 储层定量评价和计算机模拟

本篇对一些新的储层定量研究方法进行较全面的论述。第一章、第二章、第三章的第三节和第四章从不同的基点出发，论述了三种不同的储层定量模拟方法，一是基于地质统计学的随机模拟法（第一章）；二是基于泥沙运动力学的确定性模拟法（第二章、第三章的第三节）；三是基于岩石力学的有限元模拟法（第四章），它们分别用来模拟储层的空间分布、砂体的沉积过程和储层裂缝的形成规律。第三章的第一、二节从两个不同的角度论述了两种不同的储层定量评价方法，一是基于测井资料的灰色理论测井储层精细评价方法；二是基于地震资料，以层序地层学为思路的地震储层评价方法，它们分别用于单井和剖面的储层评价，以地质→测井→地震资料序贯分析为特色。

## 第一章 储层随机建模方法研究

### 第一节 随机模拟的基本原理

#### 一、储层随机建模

自从本世纪 60 年代初期，法国的 G. 马特隆教授提出区域化变量的理论并创立了地质统计学以来，利用概率统计研究地质变量空间特征的理论和实践有了很大的发展。在石油勘探开发中，由于可用的观测数据较少，且有一定的误差，因此对于地质变量的分布建立确定的模型是不现实的同时也是不合适的。只有利用概率统计模型来研究问题，才能反映并定量描述由于信息不足而引起的变化和不确定性。例如，储层中流体的流动往往用微分方程来描述，而方程的系数、初始条件和边界条件则由储层的孔隙度、初始饱和度和渗透率等各种特征所决定。因此就需要确定储层特性在空间各点处的数值。在一般情况下，只知道各井中的观测数据，要用传统的内插方法去获取储层参数在各点处的数值，这样对流动方程求出的解就会有偏差的。

通过对储层特征建立随机模型，可以把各种地质认识和观测数据有机地结合起来，并可以反映由于信息缺乏而引起的不确定性。在已经建立的随机模型基础上，再进行随机模拟便可以产生出反映储层非均质性的一系列实现。每个实现就是储层物性参数的一个空间分布，在此基础上进行数值模拟，即求解有关的偏微分方程，所得到的关于液体流动和质量转移的结果的偏差就会小一些。对应一系列实现，可产生一系列这样的结果，他们之间的差异反映了随机模型中所包含的不确定性。对于具有严重非均质性的储层，需要建立三维随机模型，以保证油气产量预测的可靠性。

随机模型在反映储层的非均质性和分数维特性方面有着重要而独特的作用。在随机建模基础上的随机模拟，可以揭示出空间地质特征的整体变异性和相关性。油藏描述中随机模型是对于二维和三维空间的，这比一维随机模型要复杂得多，主要是因为空间模型的参照域是

无次序的，因此必须寻求更有效的方法来建立简单而富有代表性的空间随机模型，并确定其有关参数。

## 二、储层随机模拟

一旦对地质特征建立了随机模型后，就可以进行随机模拟。油藏的随机模拟分为条件模拟和非条件模拟两种。非条件模拟只是要求再现地质特征的空间相关性，而条件模拟不仅要求再现地质特征的空间相关性，而且还要求在指定的位置具有指定的特性，如通过观测数据点。

对于不同的随机模型应采用不同的模拟方法。由于大型计算机的出现，使细网格和高维空间的模拟能够得以实现。在实际应用中，寻求一种快速有效的模拟算法是相当重要的。

估计和模拟之间有本质上的区别。地质统计学中的克里金估计理论是一种线性无偏估计方法。克里金估计方法是利用对观测数据的平滑算出未知点的估计。这种估计的结果反映的是大范围的趋势，小尺度的变异性被平滑掉了。然而，为了研究储层非均质性对流体流动的影响，就必须考察小尺度上的变异性。因此为了研究再现储层的非均质相关结构，那么非条件模拟就足够了。在连续高斯随机模型假设之下，经典的非条件模拟方法有旋转带法、协方差矩阵 LU 分解法和谱分解法等。

以上已经指出，克里金估计得到的曲面具有大尺度的变异性，而克里金估计误差则具有小尺度的变异性。因此，把小尺度的变异性加回到克里金曲面，就可以得到既通过观测数据点，又能满足指定变异性的随机模拟的结果。这个思路为从非条件模拟入手进行条件模拟提供了具体的方法。

由于一个空间变量的克里金曲面与克里金误差之间是相互独立的，因此这个克里金曲面上加上对该变量进行模拟的一个实现的克里金误差以后，不会影响该克里金曲面变异性。所以把来自该变量的非条件模拟的克里金误差加到通过观测数据的克里金曲面上去，就可以产生一符合要求的条件模拟的结果。这样，虽然需要进行两次克里金估计，但由于数据构型是相同的，因而克里金加权只须计算一次。由于模拟的实现包含了比采样尺度还要小的尺度上的变异性随机成分，而且还要把它们限制在观测数据之下以及具有相同的空间相关结构，因此，这些实现较为相似。此外，所用的观测数据越多，这些实现之间的差异越小。

在实际中，要根据研究对象的性质来决定是采用估计还是模拟。可以证明，如果把条件模拟的结果视为克里金估计值，那么其误差就相当于一般的克里金估计误差的 2 倍。随机模拟的早期应用偏重于对具有空间连续性的储层性参数的模拟。这就是所谓的离散性示性点过程和马尔可夫随机域建模的模拟。这种地质特征的建模和模拟需要有较高的技巧，必须把地质认识、地质资料有机结合以便得到客观存在的沉积相分布的最可能的特征。

储层沉积相分布及物性参数空间分布的模拟可看成是静态的，而流体流动性态和注水开发油田中油气产量的模拟可看成是动态的，动态模拟需要将静态模拟的结果作为其输入信息。目前对储层含油气体积的模拟和油气产量的模拟越来越受到人们的重视。它们的优点是明显的。由于描述油藏的信息不足，因此所作的各种估计和预测包含程度不同的不确定性，以一个确定的数值来表达最终的预测结果，对预测的成功程度没有一个定量的评价，显然是不合适的。然而，如果采用随机模拟的方法，就不会出现这样的问题。随机模拟最终提供给决策者的是一个预测量的概率分布，而不是一个确定的值。从这个概率分布中可以求得最可能的预测值，并给出相应误差的置信度。

随机模拟作为描述和研究油藏的一种方法，其应用越来越广泛。模拟的思想符合人们的认识过程，模拟的结果已经被越来越多的地质学家和油藏工程师们所接受。

总起来说，油藏的随机建模和随机模拟的原理可以用图 1-1-1 示意。

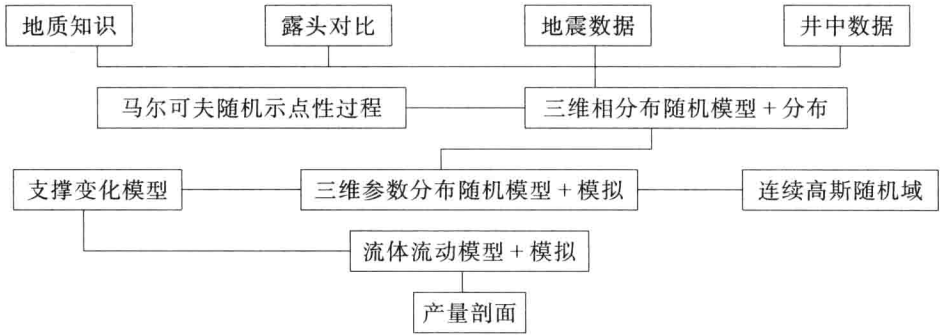


图 1-1-1 油藏随机建模和随机模拟原理图

### 三、储层两阶段随机模拟

该方法综合了近年来出现的各种模型和方法，适用于储层的大范围非均质性。这种非均质性可以是岩石类型的不同而引起的，也可以是由一种岩石内部性质的固有空间变化引起的。该方法的主要步骤如下：

第一阶段，由不同的地质体或不同沉积相所引起的大范围非均质用离散的示性点过程进行建模，其模型参数是从地震数据，测井数据和露头数据来获取。第二阶段，在第一阶段模拟结果的基础上，利用多元高斯场对不同沉积相带和各种物性参数分别建模。对不同的沉积相带，对应的高斯随机场的参数是有差异的，露头数据、井中的岩心数据和测井数据用来确定有关变量的变化、各变量的关系和空间结构，进而求取有关随机模型的参数。

第一阶段的模拟结果保留了变量的主要空间结构和形态，而第二阶段模拟的主要作用则在于揭示储层的小范围变化。无论是在哪个阶段，随机模拟均要以井中的观测数据为条件。

事实上，分两阶段进行建模和模拟，体现了将地质变量进行分类然后分别处理的思想。在第一阶段，沉积相类型的标签是离散的，需要用离散型变量进行描述，因此建立的模型是离散的示性点过程，其中往往隐含了离散的马尔可夫型，第二阶段处理的是每个沉积相内部的物性参数，在空间上是连续变化的，因而建立的模型是连续的高斯随机域。

综上所述，两阶段随机建模和随机模拟是一种通用的方法。通过各阶段的随机模拟，将再现油藏不同尺度上的变异性 and 不确定性，进而将这些模拟的结果作为油气产量过程的输入信息，评价出预测的可靠性。

### 四、多个变量的联合模拟

在许多实际应用中，再生多个变量的空间相依性是至关重要的。例如对斑岩铜—金矿沉积的实际建模必须考虑铜—金品位的交互相关性；对储层建模时常需考虑孔隙度、渗透率与含油饱和度的共同知识。

大多数基于随机函数的模拟算法都可以推广（至少理论上）到通过考虑一个向量值随机函数  $Z(u) = \{Z_1(u), Z_2(u), \dots, Z_k(u)\}$  的几个变量的联合模拟。问题主要归结为对于交互协方差阵的推断与建模：

$$\Sigma = [C_{kk'}(h) = \text{cov}\{Z_k(u), Z_{k'}(u+h)\}, k, k' = 1, \dots, K]$$

由于实际问题的复杂性，几个变量的联合模拟很难通过理论指出的那样大范围的实施。然而，可考虑各种近似的方法，通常用下面两种方法：

(1) 通过对  $K$  个原始  $Z$  变量的独立因子  $Y_k(\mathbf{u})$  的模拟代替  $K$  个相依变量  $Z_k(\mathbf{u})$  的模拟，如果：

$$Y = y(Z), \text{ 那么: } \mathbf{z}^{(l)} = y^{-1}(\mathbf{y}^{(l)}) \quad (1-1-1)$$

式中  $\mathbf{y}^{(l)} = [y_1^{(l)}(\mathbf{u}), \dots, y_k^{(l)}(\mathbf{u}); \mathbf{u} \in A]$  是一系列的被模拟的独立因子。

$\mathbf{z}^{(l)} = [z_1^{(l)}(\mathbf{u}), \dots, z_k^{(l)}(\mathbf{u}); \mathbf{u} \in A]$  是一系列最终的被模拟的值，它们内部的相依性是通过共同的逆变换来保证的。

除去一些特殊情况，此时由于物理背景需选用非线性因子  $\mathbf{y}$ ，以及一些情况要考虑变量和限制（如在化学分析中的情形），经常使用的是线性因子，它们基于原始  $K$  个变量  $Z_k(\mathbf{u})$  协方差矩阵  $\Sigma$  的正交分解。协方差矩阵的正交分解为：

$$\Sigma(\mathbf{h}_0) = [\text{cov}\{Z_k(\mathbf{u}), Z_{k'}(\mathbf{u} + \mathbf{h})\}, k, k' = 1, \dots, K]$$

相应于某一个单一的向量  $\mathbf{h}'_0$ 。Z 正交相关性只是对某特定的分隔距离再生。为了方便起见，常选零距离  $\mathbf{h}'_0 = 0$ ，这样作的理由就在于交互相关性在零距离上为最大值。

(2) 第二个近似的方法是非常方便的。首先对重要的或相关性最好的变量（称为主变量） $Z_1(\mathbf{u})$  进行模拟；然后，其它相关变量  $Z_k(\mathbf{u})$ ， $k \neq 1$ ，通过对特定的条件分布进行抽样进行模拟。例如在储层物性模拟中：

首先对孔隙度  $\Phi(\mathbf{u}) = Z_1(\mathbf{u})$  进行模拟，这是因为孔隙度的变化较为光滑且易于推断。

来自于条件分布  $\text{Pr}\{K_h(\mathbf{u}) \leq z_2 | \varphi(\mathbf{u}) = z'_1\}$  对水平渗透率  $K_h(\mathbf{u})$  进行模拟，该条件是在同一位置给定模拟的孔隙度值  $z'_1$  时  $K_h(\mathbf{u})$  的条件分布。该条件分布可直接通过  $K_h$  关于  $\varphi$ （相应于同一位置）的样本散点图进行推断。

接着，给定一个水平渗透率的模拟值  $K_h(\mathbf{u}) = z'_2(\mathbf{u})$ ，垂直渗透率的模拟值可通过对  $K_h$  关于  $K_v$ （相对于同一位置）样本散点图抽样而得。

此时， $K_v$  和  $\varphi$  之间的交互相关性间接地被给予近似考虑。类似地，次变量  $K_h(\mathbf{u})$  和  $K_v(\mathbf{u})$  的空间自相关性通过主变量  $\varphi(\mathbf{u})$  而间接地再生。该方法假设了这样一个条件，那就是通过选择配置协同变量而屏蔽任何其它数据的影响。如对上例：

$$\text{Pr}\{K_h(\mathbf{u}) \leq z_2 | \mathbf{u} \text{ 邻域中的信息}\} \approx \text{Pr}\{K_h(\mathbf{u}) \leq z_2 | \varphi(\mathbf{u}) = z'_1\} \quad (1-1-2)$$

## 五、序贯模拟

式 (1-1-2) 允许对给定同一位置  $\mathbf{u}$  的相关性最强的协同变量的值时，通过对  $Z(\mathbf{u})$  的条件分布进行抽样。序贯模拟思想是这个思想的一般化：条件含义可以超出包含  $\mathbf{u}$  的一个邻域内所有可用的数据，即包括原始数据和所有先前已模拟的值。

考察  $N$  个随机变量  $Z_i$  的联合分布，在此  $N$  非常大。 $N$  个随机变量  $Z_i$  可以表示一个区域  $A$  离散成一个网格在  $N$  个格点上的同一属性，也可表示在同一位置测量的  $N$  个不同属性或表示在一个网格的  $N'$  个格点上  $K$  个不同属性的组合，此时， $N = KN'$ 。

其次，考虑  $N$  个随机变量，当给定任何类型的几个数据时的条件，记为  $| (n)$ 。相应的  $N$  元 cdf 表示成：

$$F_N(z_1, z_2, \dots, z_N | (n)) = \Pr\{Z_i \leq z_i, i = 1, 2, \dots, N | (n)\} \quad (1-1-3)$$

表达式 (1-1-3) 完全是一般化的, 并无任何限制, 变量  $Z_i$  中的全部或者一部分可以是范畴变量。

为了得到来自于 cdf (1-1-3) 的  $N$  元样本, 可以由  $N$  个相继的步骤来完成, 每一步是从一个单变量 cdf 中抽样, 条件数据不断增加。

给定原始数据  $(n)$  时, 从  $Z_i$  的单变量 cdf 中抽取一个样本  $z_1^{(l)}$ 。该值  $z_1^{(l)}$  可以看成是以下抽样步骤中的条件。因此信息集  $(n)$  被更新为:

$$(n+1) = (n)U\{Z_1 = z_1^{(l)}\}。$$

给定更新数据集  $(n+1)$  时, 从  $Z_2$  的单变量 cdf 中抽取一个样本  $z_2^{(l)}$ 。则更新后的信息集为:

$$(n+2) = (n+1)U\{Z_2 = z_2^{(l)}\}。$$

序贯地考虑  $N$  个随机变量  $Z_i$  的模拟联合实现。如果需要另外一个实现的话  $\{z_i^{(l)}, i = 1, 2, \dots, N\}$ , 那么, 整个序贯抽样过程可以重复一次。

序贯模拟过程需要确定  $N$  个单变量的 cdf, 更精确地讲:

$$\begin{aligned} & \Pr\{Z_1 \leq z_1 | (n)\} \\ & \Pr\{Z_2 \leq z_2 | (n+1)\} \\ & \dots \\ & \Pr\{Z_N \leq z_N | (n+N-1)\} \end{aligned} \quad (1-1-4)$$

序贯模拟的思想独立于建立 (1-1-4) 中单变量 cdf 的算法与模型。在程序设计和相应的算法中, 所有 cdf (1-1-4) 通常假设为高斯的, 它们的均值与方差通过  $N$  个简单克里金系统来确定。在另外一些情形, cdf 可直接通过指示克里金来得到。

实现时应注意的问题:

严格使用序贯模拟方法需要确定越来越复杂的 cdf, 即条件数据从  $n$  增加到  $(n+N-1)$ 。在实现问题中, 由于较近数据 (未必用欧氏距离来度量) 屏蔽了较远数据的影响, 只有最近数据被保留用来条件  $N$  个 cdf (1-1-4) 中的任何一个。由于前面被模拟值的数目随着  $i$  从 1 增大到  $N \gg n$  时会变得越来越大, 因而必须对原始数据  $(n)$  给予特别的重视, 即使这些原始数据比较遥远。

条件数据的邻域局限性保证  $(N+n)$  个随机函数统计性质能够被再生到邻域中所能找到的最大距离。例如, 搜索必须扩大到变异函数能够被再生的最远距离, 这需要当序贯过程从 1 增大到  $N$  时非常巨大的条件数目。一个解决该问题的办法是多步 (或多阶段) 网格概念, 此时, 我们通过两步或多步方法模拟  $N$  个网格结点的值。

首先, 一个粗网格, 如每 10 个网格为一组, 每一次每组第 10 个网格结点使用大距离邻域来模拟。大邻域允许再生大尺度变异函数结构。

其次, 剩余的网格结点用小邻域来模拟。

理论上讲，并无需指定  $N$  个结点被访问的次序。然而，实践已经证明，最好考虑一个随机序列。确实，如果  $N$  个结点按行来访问，则与理论的任何偏差会导致模拟结果人为沿着行展布的痕迹。

## 六、误差模拟

克里金的光滑效应，或更一般地任何低通过型内插器效应，主要归结为滤掉了误差成分。考虑一个随机函数  $Z(\mathbf{u})$ ，表示一个估计和相应误差之和：

$$Z(\mathbf{u}) = Z^*(\mathbf{u}) + R(\mathbf{u}) \quad (1-1-5)$$

克里金只提供光滑的变异函数估计  $Z^*(\mathbf{u})$ 。为了保留随机函数模型总方差，就必须考虑模拟一个随机函数误差的实现，其有零均值和相应的方差及协方差。模拟的  $z$  值应该是唯一的估计值与一个模拟误差值之和：

$$z^{(l)}(\mathbf{u}) = z^*(\mathbf{u}) + r^{(l)}(\mathbf{u}) \quad (1-1-6)$$

该思想是相当简单的，但需要两个较严格的条件：

(1) 误差成份  $R(\mathbf{u})$  必须独立，至少正交于估计  $Z^*(\mathbf{u})$ 。如果这样的话，误差值  $r^{(l)}(\mathbf{u})$  可以独立地模拟，亦可加回到估计值  $z^*(\mathbf{u})$ 。

(2) 建立的误差随机函数模型  $R(\mathbf{u})$  必须与真正的误差有相同的空间分布，至少有相同的协方差结构。如果这样的话，在 (1-1-6) 中的模拟值与真实值  $Z(\mathbf{u})$  具有相同的协方差，从而有协同的方差。

条件 (1) 可以满足，如果我们把  $Z(\mathbf{u})$  正交投影到数据集的某个 Hilbert 空间上得到估计  $Z^*(\mathbf{u})$  即可，此时，误差向量  $Z^*(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u})$  正交于估计  $Z^*(\mathbf{u})$ 。如果  $Z^*(\mathbf{u})$  是  $Z(\mathbf{u})$  的简单克里金就可满足。

条件 (2) 难于满足，这是因为协方差是未知的，更糟的是，它未必是平稳的，即使随机函数  $Z(\mathbf{u})$  是平稳的。这主要是由于当从一个位置到另一个位置时，数据构形是不同的。解决该问题的一个方法是利用来自于同一构形的数据模拟 (1-1-6) 中的误差值。

更确切地讲就是考虑一个非条件模拟实现  $z^{(l)}(\mathbf{u})$ ，它在网格结点与真实位置皆有值。该参考模拟与随机函数模型  $Z(\mathbf{u})$  有相同的协方差。模拟值  $z^{(l)}(\mathbf{u}_\alpha)$ ， $\alpha = 1, 2, \dots, n$  在  $n$  个实际位置保留，基于实际数据的估计算法再重复一次。这就提供了估计值  $z^{*(l)}(\mathbf{u})$  的一个模拟，因此也模拟了误差  $r^{(l)}(\mathbf{u}) = z^{(l)}(\mathbf{u}) - z^{*(l)}(\mathbf{u})$ 。这些模拟误差简单地加回到基于原始数据  $z(\mathbf{u}_\alpha)$  的实际估计值  $z^*(\mathbf{u})$  上去。

$$z_c^{(l)}(\mathbf{u}) = z^*(\mathbf{u}) + (z^{(l)}(\mathbf{u}) - z^{*(l)}(\mathbf{u})) \quad (1-1-7)$$

记号  $z_c^{(l)}$  中的下标  $c$  以示条件模拟有别于非条件模拟  $z^{(l)}(\mathbf{u})$ 。

如果采用的算法正好是克里金方法，则数据位置  $(\mathbf{u}_\alpha)$  的值将被保留，因此：

$$z_c^{(l)}(\mathbf{u}_\alpha) = z^{*(l)}(\mathbf{u}_\alpha)$$

从而有：

$$z_c^{(l)}(\mathbf{u}_\alpha) = z^*(\mathbf{u}_\alpha) = z(\mathbf{u}_\alpha), \text{ 对于一切 } \alpha = 1, 2, \dots, n.$$

最后，可以证明  $z_c^{(l)}(\mathbf{u})$  的变异函数与原来随机函数模型  $Z(\mathbf{u})$  的变异函数模型是

相同的。

实施(1-1-7)所描述的条件算法需要一个预先的非条件模拟去产生  $z^{(l)}(\mathbf{u})$  以及两次克里金去产生  $z^*(\mathbf{u})$  和  $z^{(l)*}(\mathbf{u})$ 。实际上,只需计算一次克里金权系数,因为估计  $z^*(\mathbf{u})$  和  $z^{(l)*}(\mathbf{u})$  采用的协方差函数与数据构形是一致的。

## 第二节 随机建模和随机模拟用于储层表征的若干方法

### 一、储层非均质性的评价和量化

近几年来,储层非均质性研究已越来越受到地质人员和油藏工程人员的关注,而且他们已经认识到储层的非均质性是影响提高采收率的主要原因。没有详细的储层评价就实施开发方案常会导致失败,这是由于未能识别出储层中一些遮挡带对流体流动的影响,未能搞清楚渗透率分布的非均质性以及未能正确地评价残余油的分布。另一方面,已经利用许多现代化的测试手段获得大量的储层有用数据,这就使得有可能研究非均质性对流体流动的影响。例如在储层的开发阶段,由于井跨度越来越小,大量的取芯数据、测井数据、试井数据、产量数据提供了比储层早期评价阶段更为详尽的描述。同时,大容量、高速度电子计算机的出现以及各种模拟方法的形成,使得评价储层的非均质性成为可能。

通过收集露头数据和各种地质数据,也使得可以对各种类型的非均质性进行定量处理。不同类型的非均质性只能借助于一定的模型才能更好地揭示出来。非均值性伴随着不确定性,对储层非均质性的评价依赖于是否利用已知数据正确地揭示了储层中所包含的不确定性。随机模拟技术能够给出在已知数据条件控制下,相应于一定地质概念模型,储层的各种可能的展布,各种结果的综合就反映了储层评价中所包含的非均值性和不确定性。基于特定的随机模型,可以研究在储层的各种非均质性影响下,采用开发方案的风险性。

储层的非均质性体现在储层的各种观察尺度上,即从宏观的非均质性到微观的非均质性。如来自于沉积的地质特征、大范围储层构造特征、无断层的储层内部渗透体之间的边界(这相应于储层沉积相的边界)、在每个特定类型生成元的渗透带与沉积环境和成岩作用有关的遮挡带。裂缝的出现也常常是难以量化的非均质性空隙。多孔介质内部的非均质性属于微观的非均质性。这些非均质性的观察尺度从几十公里到几个微米。

非均质性可以看作一种弱连续性和不连续性,或者说成是地质特征在一定尺度上的剧烈变异性,传统的内插平滑方法显然不适合描述储层的非均质性,必需寻找能反映储层非均质性的模型和方法。众所周知,建立的储层数学模型都必须考虑到尺度效应,这一点是不容忽视的。模型的可靠性和精度是相应于一定的井间跨度和观察尺度的,也是与井的密度有关的。例如,利用大跨度井位数据推断出来的结论只能反映储层宏观的非均质性;与研究区块具有类似地质特征的露头资料的收集。否则,模型对小尺度非均质性预测的可靠性就差一些。正由于模型的可靠性依赖于数据密度和观察密度,因而使用特定模型来预测储层的详细特征就具有不确定性,这样才能反映由于掌握信息有限所引起的不确定性。储层的随机建模和随机模拟技术的应用,可以有效地刻划和定量评价储层的非均质性,下面就具体地讨论随机模拟技术应用于油气储层评价中的若干方面。

### 二、随机模拟应用于储层静态行为的研究

#### 1. 对河流三角洲砂体露头研究和随机建模

可以给出三角洲砂体的岩性空间分布并根据露头资料建立相应的随机模型,利用露头岩

相资料和已知数据确定不同岩相在不同参照水平面相应的频率，用不同频率值对高斯随机函数进行截断，然后确定不同岩相的变异函数与交互变异函数，最后可给出河流三角洲砂体岩相模拟结果。这样处理的优点在于如下几个方面：

- (1) 可以反映三角洲砂体岩相在空间剖面上的沉积次序关系。
- (2) 可以反映不同岩相在空间累积频率分布情况。
- (3) 利用露头资料可以使二维岩相的研究容易过渡到岩相在三维空间的展布。

(4) 砂泥岩夹层在三角洲砂体中分布较广，直接影响三角洲砂体在三维空间的展布，而露头研究对砂泥岩夹层的分布和相互关系是至关重要的。

可用截断高斯模拟方法来解决上述问题。

## 2. 断层带的随机建模和模拟

许多油藏特征受到断层和裂缝的影响，一般来讲，落差大于 20m 的较大断层带可以从地震记录中识别出来，然而构成这种大范围断层带的大量的小断层是无法在地震记录中观察到的。断层可以是一个单元的地层沿着某个连续平面下滑，也可以由许多小的裂缝组成。虽然断层带中实际的断裂类型支配着流体的流动是一个众所周知的事实，但是对于穿过断层流动的准确机理，目前还未有满意的解释。然而，地质学家对断层的断裂类型进行了大量的研究，对其中的一些作用力给出了一定的解释。因此，利用随机建模和随机模拟对断层及其断裂类型的识别和研究，其必要性和可能性是十分明显的。

小的断层和裂缝在地震记录中是无法观察到的。它们的外观、方向和大小依赖于由它们所构成的主断层带。建立随机模型要根据一般的构造地质方面的知识。利用随机模拟，不仅会产生和断裂类型有关的各种实现，而且还可以用断层中心线，垂直落差和水平范围等可以观察到的信息对实现进行条件控制。每一个实现又可作为油田产量模拟的输入，以便评价断裂类型对油气产量的影响。

以上问题可以用示性点过程随机方法来解决。

## 3. 碳酸盐岩储层裂缝分布的随机模拟

碳酸盐岩是沉积岩三大类型之一，我国近十年来油气勘探在碳酸盐岩领域也有重大突破，碳酸盐岩储层已成为重大的石油地质研究内容之一。认识和识别碳酸盐岩对于油气勘探具有重要的理论意义和实用价值。由于构造作用而形成的裂缝性碳酸盐岩储层在碳酸盐岩储层中占有相当大的比重，如何有效地描述和预测碳酸盐岩中裂缝的位置和分布将成为一个非常重要的问题。裂缝储层比较复杂，而且定量描述有相当大的困难。在很多情况下对这种储层描述方法并不十分满意。但是，如果把裂缝模型定量地用一种叠代函数系统（简记 IFS）来描述，运用分形模拟方法，可以给出具有类似分形特征的裂缝分布模拟结果。

具体应用时需使用的信息有：

(1) 形成储层的沉积演化过程、地质特征、地质构造运动过程、应力规律等一系列地质知识，这些对于我们形成储层裂缝分布的地质概念模型是至关重要的。

(2) 裂缝数据，包括已知的裂缝位置、长度、密度等（这些可利用地震与倾角测井资料给出）。

## 4. 储层内部物性参数非均质性分布的随机模拟

储层内部物性参数非均质性分布已愈来愈受到地质人员的重视。正是这种非均质性使得预测储层的动态行为增加了很大难度。对储层物性非均质性认识不足常常导致过于乐观地估计了采收率、过于简单地布置了注水井和开发井，从而收到的效果并不令人满意。为此必须

使用随机模拟方法对储层物性空间分布的非均质性进行充分的描述，只有这样，才能了解利用已知资料和已知模型究竟在多大程度上控制着储层的行为，到底还有多少不确定性有待去探索。

经常使用的模拟储层物性分布的地质统计学方法有：序贯高斯方法、序贯指示方法、LU分解法等。

#### 5. 河流相储层砂体连通性分布的随机模拟

河流相储层常具有难以描述的几何结构，这往往可归结为砂体伴随着较复杂的沉积环境。好的砂体（高渗性）和不好的粉砂岩（低渗性）、泥质砂岩、泥岩经常混合在一起。油气在采收过程中，主要流动路径是通过砂岩进行的，穿过不好的岩石的流动速度太慢且变得没有经济价值。很清楚，在特定的井位构形下，砂岩的连通性对于确定油气的采收率是至关重要的。若进一步能确定整个连通砂岩体的形状，那么对获得储层流动性态的信息是很有意义的。通过相应的随机模拟技术来揭示河流相重叠砂岩分布连通性和传导性的一般特征是可行的。可以考虑这样一个简单的砂体模型，那就是把砂体看作是一种随机放置的几何形体，嵌入在一种非渗透性的岩石之中。虽然这种假设在地质上不具有一般性，但它确实能提供洞察这种复杂系统行为的一种强有力的工具。可通过随机点的过程中的渗透理论（Percolation Theory）模型来解决这个问题。通过模拟结果表明：当有效厚度低于某个特定的阈值后，砂体不具有连通性。当有效厚度大于这个特定的阈值时连通性将有很大程度的提高，然而有效渗透率的增长却比较缓慢。而且，将渗透理论用于不同观察尺度时，不难发现连通性和传导性随着井跨度的增加而减少。

#### 6. 河流沉积相分布的随机模拟

沉积相的模拟也是随机模拟技术应用的一大方面。地质沉积相的描述和刻画对于研究储层行为起决定性作用。对河流相沉积，如何有效地寻找河道砂体位置和延伸范围对搞清储层的动态行为是至关重要的。对曲流河道砂体分布的描述可用两种基本的方法来处理。

- (1) 示性点过程随机方法，又称为面向对象的方法。
- (2) 指示方法。

面向对象的方法主要把描述的沉积对象看成是在三维空间中其位置、长度、宽度、厚度等具有一定分布且有相互作用，然后建立相应的随机模型并进行相应的模拟。这种方法的缺点是难以条件化到已知的实验数据，优点是服从几何体形状的空间分布。指示方法的缺点是不能完全描述几何体形状，但优点是易于操作并条件化到已知的实验数据。

对于辨状分流河道沉积相的模拟，可以建立相应的随机模型——随机游走模型，并给出相应的模拟结果。结果表明，该方法是解决这一难度较大问题的有用工具。

### 三、储层含油气体积的随机模拟

由于储层结构的复杂性和所占有资料的局限性，在利用传统方法预测含油气体积的过程中存在着不同程度的不确定性。这种不确定性反映了预测储量和实际储量之间的差异。为了在油气储量的预测中考虑到这种不确定性，并将它进行量化，需要采用随机模拟的方法，通过对储层几何特征及其中物性参数的模拟，可以求取储量的各种可能预测值从而得到储量预测的概率分布曲线。该概率曲线既包含了人们对实际问题的认识，也反映了预测所包含的不确定性。

评价油藏的各个阶段的行为都要对油气体积进行预测，为此需要以下信息：

- (1) 地震资料，它们具有较好的空间复盖性，但精度较差。

(2) 井中的观察数据, 包括储层的埋深和物性参数, 由于井的数据量有限, 这种数据的数量较少, 但比较精确。

(3) 来自邻近地区的储层评价经验, 它们难以公式化。

如果对一个储层的各项参数完全了解, 那么其含油气体积 HCPV 可利用下式求取:

$$V_H = \int_{D_R} \varphi(x)(1 - S_W(x))du = \int_{D_o} I_r(x)\varphi(x)(1 - S_W(x))dx \quad (1-1-8)$$

式中 随机函数  $\{I_r(x); x \in D_o\}$  ——储层的位置和范围。

$$I_r(x) = \begin{cases} x \text{ 在储层中} \\ \text{其它} \end{cases}$$

称之为几何变量; 随机函数  $\{\varphi(x), S_W(x); x \in D\}$  称之为物性变量, 它们分别代表孔隙度和含水饱和度。区域  $D_o$  是一个包含了储层的固定空间区域; 根据实际的地质知识,  $\varphi(x)$  和  $S_W(x)$  互相有一定关系。

对以上的随机函数都必须给出相应的随机模型, 且具有相应的模型参数。可使用传统的蒙特卡罗模拟方法生成 HCPV 值并进而得到 HCPV 的概率分布。

$$\Pr\{V_H < v\} = F_H(v) \quad (1-1-9)$$

这是我们要得到的储层含油气体积预测值的累积分布函数。

#### 四、随机模拟用于油气产量预报

##### 1. 建立描述储层非均质性的地质模型

油藏工程研究基本上考虑如下问题:

- (1) 估计储层在空间的位置以及可采油气的分布;
- (2) 提出一种油田开发方案;
- (3) 进行油田产量预报。

这些预测的质量依赖于对“系统成分”的认识, 那就是:

- (1) 容器 (储层);
- (2) 内容 (空间的流体);
- (3) 相互作用以及对产量的影响。

特别值得指出的是, 必须充分了解下列诸多方面:

- (1) 多孔介质的结构以及流体迁移的地质环境;
- (2) 空间流体的热力学性质;
- (3) 物理规律和物性参数, 它们可用于对流体和外部作用力之间的关系进行建模;
- (4) 边界条件 (流体压力条件, 输出井的情况等)。

70 年代的研究工作主要集中在如何增加油气采收率的各种方法上 (如何注入混相或非混相气体、活性剂和聚合物溶液、蒸气或热水等)。主要目的在于提高油气产量, 或者讲研究主要集中在 (2)、(3) 两个方面。但自从 80 年代中期以来, 储层表征和非均质性对流体流动性态影响的研究工作加快速度发展。这方面的研究工作已成为许多研究项目的主要内容。

非均质性对产量的影响已显得愈来愈重要, 它对流体流动的物理化学性态有重要的影