

联合资助

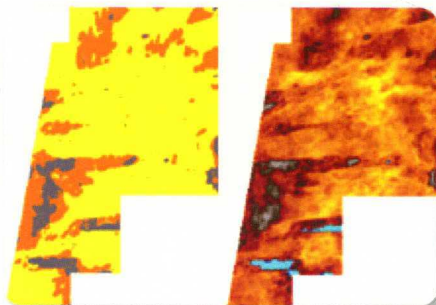
“十二五”国家科技重大专项 (2011ZX05032)

国家863重点项目 (2007AA0605)

国家自然科学基金项目 (50874091, 50474042)

# 储层建模

## 与油气田开发 《《



王家华 黄文松 陈和平 等编著

石油工业出版社

国家重点专项 (2011ZX05032)

国家 863 重点项目 (2007AA0605)

国家自然科学基金项目 (50874091, 50474042)

联合资助

# 储层建模与油气田开发

王家华 黄文松 陈和平 等编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书从井间砂体预测、地震约束建模、地质统计学历史拟合和决策分析与风险分析四个方面入手,初步论述了储层建模在油气田开发中的应用。本书总结涵盖了“十二五”国家科技重大专项、国家863重点项目以及国家自然科学基金项目的成果,也涵盖了油气田现场的协作成果。

本书可供从事储层建模专业技术人员阅读,也可供石油地质与油气田开发等相关专业技术人员及大专院校师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

储层建模与油气田开发 / 王家华 黄文松 陈和平 等编著.  
北京:石油工业出版社,2018.10

ISBN 978-7-5183-2836-9

I. ①储… II. ①王… III. ①油气藏—储集层—建立  
模型—研究②油气田开发—研究 IV. ① P618.130.2

② TE3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 199282 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010) 64222430

图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:17

字数:410千字

---

定价:140.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

## 本书编著人员

王家华 黄文松 陈和平 陈军斌 韩家新 吴少波

## 前 言

在储层建模技术发展的初期，人们已经明确地认识到这门技术和油藏数值模拟的密切关系。经过几十年的发展，从储层建模的发展现状可以看出，把油气田开发作为其应用目的和应用对象是一条正确道路。国内外许多文献报道，储层地质建模不仅已经在井间砂体预测、隔夹层建模、储量估算、裂缝油藏建模、水平井建模以及地质统计学历史拟合等领域取得了进展，而且在流动单元划分、不同尺度的数字岩心制作与油气田开发方案编写等传统领域上，也正在取得重要的成果。在决策分析与风险分析技术的参与和推动下，储层建模和经济数据结合，已经直接进入了油田经济管理中的各种不确定性评价。

在总结储层建模的各种算法和应用时，不应该忽视以地质统计学为代表的各种概率统计的概念、算法的参与和推动。四十年前，地质统计学作为一种概率统计方法，在矿业工程中的应用才开始，而在油藏工程方面的应用研究根本没有涉及。那时，儒耳奈尔教授（A. Journel）在其著作《矿业地质统计学》（中译本，冶金工业出版社，1982年，侯景儒，黄竟先译）中就提出了旋转带法，利用蒙特卡罗抽样方法解决矿业工程中的预测问题。四十年后的今天，经过国内外各位同行的共同努力，地质统计学及其各种概率统计方法在油气储层建模、油气藏开发等领域均取得了巨大的成绩，得到了普遍的承认，进而极大地推动了油气生产的发展。

本书叙述内容可以归纳为一个中心，就是减低储层建模的不确定性。这种不确定性严重妨碍储层建模在油田开发中的应用效果，伴随着各种地质统计学算法的运用，它是一种始终存在的关键问题。储层建模方法和技术所出现的任何一种新模型、新方法，一定会在某一角度、某一方面，存在着降低不确定性的必要。反过来说，凡是对于降低不确定性有明显价值的算法和模型，也一定意味着对油气田开发有明显的积极意义。

早在2001年，国际上有影响的储层建模专家O. Dubrule等学者在一篇论文中提出，储层地质建模具有三个方面的任务：

- (1) 地质统计学和地质学的深入研究。
- (2) 多学科的方法交叉和数据融合。
- (3) 建模不确定性的分析和研究。

这三点认识不仅全面地概括了建模研究内容和发展方向，而且深入地分析了这些研究内容之间的辩证关系。十多年以来，储层地质建模理论和应用的发展验证了这些专家论断的正确性。其中，(1)、(2)两个研究任务的目的是为了降低储层地质建模的各种不确定性。这三个任务的划分为地质建模的发展揭示了一条科学的途径，使其成为油气田开发服务的技术关键。

储层地质建模从诞生开始，就将油气田开发作为应用目标，而且在为油气田开发服务中不断产生新的建模方法和新的应用课题。各种储层建模新方法的出现，都有着油气田开发需要的背景。

本书以储层建模的不确定性研究的概述作为第1章的内容。这是因为人们发现不确定性研究对于储层地质建模具有越来越重要的特殊意义。本书的各个研究方面的撰写都可以视为从降低建模不确定性的角度出发的。用一句话来表达本书的宗旨就是：减少建模的不确定性。本书的其余各章从各个不同的角度，叙述了减少不确定性的具体过程。储层建模只有在减少不确定性方面不断地取得进展，才能解决油气田开发的一个个实际问题，才能在油气田开发中赢得宝贵的一席之地。

在第2章中，叙述了多点统计建模的原理及其在河流相储层建模中的应用。多点统计建模方法已经出现十多年了。该方法经历了一个不断完善的过程，它的一个特点就是适用于河流相储层的建模。它利用地质知识库生成的三维训练图像作为一种地质约束，其建模结果能够体现在训练图像所包含的各种地质信息中，诸如河道砂体宽度、厚度、砂泥比等。多点统计建模方法利用训练图像作为一种地质约束，可以借助于地质研究的成果，达到消除不确定性的目的。

第3章的叙述表明，地震约束的多点统计建模为利用测井数据和地震数据结合实现建模提供了一种可行的途径，这对于减少井间砂体预测的不确定性具有明显的效果。其中，岩石物理学方法的应用和井震影响比的选定是两个关键。地震约束建模在胜利油田和委内瑞拉的两个区块中已经取得了初步成果。

第4章叙述了利用地质约束减少油气储量估算中的不确定性。其中一个关键是在地质建模的过程中，通过对研究区域各项地质参数的空间分布进行深入、细致分析，形成一定的地质认识，最后再对计算的油气储量进行约束，以减少其不确定性。

第5章针对河流相储层的具体地质特点，叙述了随机游走的原理以及利用随机游走方法解决辫状河储层建模的过程。

第6章叙述了地质统计学历史拟合的两个具体的方法：逐步形变法 (Gradual Deformation) 和概率扰动法 (Probability Perturbation Method)，并分析了各自的特点。这两种方法都可以利用动态数据作为约束，把储层地质建模的结果进行适当的改变，从而达到历史拟合的要求。

本书最后一章“决策分析与风险分析的应用”，是在承认储层地质建模存在着各种不确定性的前提之下，解决如何在油气田开发中运用地质建模的成果的问题。其意义在于引导储层建模的结果和经济数据结合，以直接进行油气田经济管理中的各种不确定性评价。

本书中有的内容已经发表在国内外学术刊物上，有的内容则是第一次发表。关于逐步形变法、概率扰动法、风险分析、决策分析的内容则是根据国内外发表的多篇文献编写而成。

储层地质建模的发展历史，可以说是一部不断克服、降低不确定性的各种算法的发展历史，也是一部不断为油气田开发作出贡献的历史。储层地质建模就是在不断克服、降低不确定性的过程中，一步一步地发展、完善，从而一点一点地接近储层的真相，并为油气田开发作出贡献。

储层地质建模不可知论的观点，肯定是具有片面性的。历史和实践已经雄辩地证明，经过三十多年的不懈努力，通过不仅有地质统计学专家教授的参与，而且有开发地质学家、地球物理学家与油气藏开发工程专家的参与，各学科的学者和专家凭借各自的专业特长，在地质统计学与不确定性分析的共同平台上，促进了油气田经济、高效地开发。

本书同时也是对“十二五”国家科技重大专项课题“委内瑞拉 MPE3 区块超重油油藏多点地质统计学建模方法研究”（2011ZX05032-001）成果的一个总结。在五年的课题研究过程中，根据研究方案的需要，笔者深入阅读、分析了国内外的有关文献，运用各种储层建模方法，处理、分析了大量的数据，取得了如期的研究成果。这些成果已经为油田实现经济、高效开发提供了有力的保证。

在顺利完成“十二五”国家科技重大专项关于多点统计建模的研究任务后，我们抱着十分喜悦的心情，对以往的工作进行了细致的总结，对储层地质建模的最新发展及其在油气田开发中的应用进行了深入、系统地探讨和阐述，同时我们期待着各位学者和专家对本书的批评、指正。另外，为保留书中某些引用文献的图、文原貌并照顾现场使用习惯，本书部分地方保留了非法定计量单位，请读者阅读时注意。

2018 年 7 月

# 目 录

<b>1 储层建模不确定性研究</b> .....	1
1.1 随机变量和随机函数 .....	2
1.2 蒙特卡罗抽样模拟 .....	3
1.3 建模的不确定性研究的进展 .....	5
参考文献 .....	7
<b>2 多点地质统计学算法原理及其河流相储层建模</b> .....	8
2.1 两点建模到多点建模 .....	8
2.2 地质知识库和训练图像 .....	12
2.3 多点建模的基本原理 .....	37
2.4 训练图像的制作和多点建模实例分析 .....	46
2.5 小结 .....	84
参考文献 .....	84
<b>3 地震约束建模与井间砂体预测</b> .....	86
3.1 井间砂体建模的不确定性 .....	86
3.2 地质约束建模的原理与发展 .....	94
3.3 地震约束建模的应用 .....	110
参考文献 .....	128
<b>4 地质约束减低概率储量的不确定性</b> .....	131
4.1 概率储量的原理和发展 .....	131
4.2 不同建模方法获得的概率储量分析 .....	133
4.3 地质约束减低气藏概率储量的不确定性 .....	140
参考文献 .....	146
<b>5 随机游走建模方法的原理与应用</b> .....	148
5.1 随机游走的原理 .....	148
5.2 随机游走在密井网河流储层建模中的应用 .....	154
5.3 自回避随机游走在曲流河储层建模中的应用 .....	164
5.4 小结 .....	198



参考文献 .....	198
<b>6 逐步形变法和概率扰动法：地质统计学历史拟合 .....</b>	<b>201</b>
6.1 逐步形变法的原理 .....	201
6.2 概率扰动法的原理 .....	207
参考文献 .....	210
<b>7 决策分析与风险分析的应用 .....</b>	<b>212</b>
7.1 决策分析与风险分析的产生与发展 .....	212
7.2 决策分析原理及其应用 .....	222
7.3 风险分析原理及其应用 .....	240
7.4 总结 .....	257
参考文献 .....	258
<b>后记 .....</b>	<b>260</b>

# 1 储层建模不确定性研究

三十多年的理论发展和实际应用证明，利用地质统计学基本理论和基本方法进行储层地质建模这一随机方法，已经成为油气田开发中经常采用的有效方法之一。

随着油气资源需求的增加和油气田开发技术日趋成熟，在储层评价和优化油田开发方案方面，油藏描述和不确定性分析变得极为重要，油气储层的不确定性研究已成为油藏建模的核心问题 (Elgsaeter, 2008)。由于二次采油和三次采油工程非常复杂，以及投资决策对不确定性的依赖，地质学家和工程师们正努力降低和量化油藏模型中的不确定性 (Massonnat, 1999)。

储层模型常被用于地下资源评价和油气田开发规划。而要对油气田进行最优评价和开发，要求对储层进行逼真的描述。也就是说需要综合地描述油藏并利用所有可用的、有效的数据建模，并对模型中的不确定性进行必要的量化，以此来构建逼真的储层模型，减少并量化油藏描述中存在的 uncertainty。然而，由于地下储层的复杂性，加上非常有限的基础数据，使得建立的储层模型往往存在大量的不确定性，因此研究和降低油藏建模中的不确定性并对其进行分析，是储层建模技术所面临的必然趋势。

储层建模的不确定性分析是为了适应建模方法本身的特点而提出来的，也是对整个建模方法的一种完善和实用化。不确定性分析通常涉及随机模拟的算法特点分析和各类不同数据的整合，其动力是对地质认识的运用和各种数据的约束作用。进行储层不确定性分析的目的是为了更好地了解和研究不确定性，进而寻求更好的油藏建模技术与方法来降低建模过程中的不确定性 (Ma, 2011)。地下储层是复杂地质作用的结果，是确定的、唯一的。然而，对储层资料不完整的层位而言，对比如对沉积微相、孔隙度、渗透率、含油或含水饱和度等属性的推测则看成是不确定的；同时，由于地质研究、地球物理和油藏工程观察手段以及各种解释方法的局限性，使得对地下储层性质和储层物性参数的认识也都带有各种不确定性。

地下储层的非均质性导致了地质认识上存在不确定性。非均质性可以看成是地下储层构造在一定尺度上的剧烈变异。正由于存在这些剧烈变异，使得借助有限的基础地质资料来预测储层的性质就存在很大的不确定性。因此，对研究区域进行详细的、深入的储层地质研究，是降低储层建模不确定性、提高建模结果精确程度的重要手段之一 (Ettehad, and others, 2011; Idrobo, and others, 2004)。

随机建模技术的出现和应用,实现了定量评价储层非均质性。随机建模算法所生成的建模结果具有多解性,是不确定性的一种具体体现,也是研究不确定性的一个具体的切入点。随机建模技术能够在一定的控制条件下,给出储层的各种等概率的展布,这些等概率的展布反映了储层的非均质性和不确定性(李少华等,2004)。当可用的基础地质资料有限或储层地下地质情况很复杂时,使用某一个随机种子的方法所得到的储层模型是难以准确地描述真实地质体的,更不能精确地反映实际地质体认识过程中的不确定性(霍春亮等,2007)。将所在研究地区的地质研究作为基础,采用随机建模技术,选择合理的数学算法,借助多组等概率地下储层地质模拟实现,反映地下储层模型的不确定性等,是目前储层数字化过程中亟待解决的问题。

由于地质统计学的快速发展,储层物性建模技术可以融合诸如地质、测井、地震、油气藏动态等多尺度数据,建立测井解释、地震解释、储层沉积学、储层建模、油气藏数值模拟等方法和技术的技术平台,这顺应了实际应用的需要(尤少燕等,2005)。随着地震解释技术的发展,以及三维地震技术与高分辨率地震技术的出现,使得利用地震技术对油气藏进行解释开始出现。地震记录的资料丰富,在横向上能够反映大范围的地质构造和砂体变化等特征,并能够进行大面积追踪。地震解释后的区域地层、岩相和储层特征都是有价值可供利用的资料。测井资料在垂向上具有很高的分辨率,可以提供局部的储层资料,但是在缺少井或井数很少的区域,很难对油气藏进行精确的评价。但如果采用某种方法,把地震观测得到的资料与测井数据综合起来,发挥各自的长处,就能建立高精度的地质模型,大大地降低所建模型的不确定性,改善所建立的沉积微相、孔隙度、渗透率和饱和度的建模结果。

本书所述的不确定性分析主要是指,通过参考国内外相关文献中关于储层建模的不确定性研究方法,分析建模过程中引起不确定性的主要来源,进而找到降低不确定性的方法——即井震结合建模降低不确定性,并将该方法模拟结果与测井资料建模模拟结果的不确定性进行对比。这些研究的根本目的和意义就是要寻求更好、更先进的建模技术,降低油藏建模中的不确定性,减少油气藏开发的各种风险,更好地指导油气田开发工作。

储层地质建模使用的地质统计学算法是随机算法,但是所用的数据却都是确定的。在储层的一个三维区域内,一个建模结果又是完全确定的,完全作为油藏数值模拟的输入。这说明储层建模的算法是在完全确定的数据之下,如何运用随机算法,如何产生不确定性的问题,也是如下关于随机函数、蒙特卡罗算法的叙述的主要目的。

## 1.1 随机变量和随机函数

利用随机变量和随机函数描述储层建模的原理是储层地质建模的一个特点。

随机变量是一个实值函数,其定义域为样本空间上的试验结果。它的取值是由试验

结果决定的,对于随机函数的各种取值可以赋予不同的概率。例如,空间以点  $(x, y, z)$  为中心的网格块的孔隙度就是一个随机函数,可以具有均值、方差等统计量。随机变量  $X$  代表着一种对应关系。按照这个关系,对于一个随机试验的每个结果  $\zeta$ ,都可以赋予一个数值  $X(\zeta)$ ,而且可以给一个随机变量的各个可能值给定相应的概率。

随机函数是储层地质建模中最基本的概念之一,对空间的模拟问题和预测问题的全部讨论都可视为对随机函数的讨论,因此有必要在这里对随机函数理论进行简要叙述,以下的叙述参考了 Papoulis (1984) 的专著中的提法(王家华, 1999)。

三维空间中定义的一个随机函数  $S(x, y, z, \zeta)$  是指,给定三维空间中的一个点  $(x, y, z)$ ,对于每个  $\zeta$  赋予一个函数  $S(x, y, x, \zeta)$  的对应关系。所以,随机函数是依赖于参量  $\zeta$  的一族空间函数,即它同时是空间变量  $x, y, z$  和参量  $\zeta$  的函数。 $\zeta$  的定义域是全部试验结果的集合,  $x, y, z$  的定义域则是一个三维空间中一个区域内各个点的一个集合。

如果用符号  $S(x, y, z)$  表示一个随机函数,以省略其对  $\zeta$  的依赖关系,因而  $S(x, y, z)$  将具有如下四种含义:

(1) 它是一族自变量为  $x, y, z$  和  $\zeta$  的函数  $S(x, y, z, \zeta)$ 。

(2) 当  $\zeta$  固定时,  $S(x, y, z, \zeta)$  表示的是该函数的一个实现,仅是三维空间中点  $(x, y, z)$  的函数。

(3) 当  $(x, y, z)$  固定,而  $\zeta$  是变量时,那么  $S(x, y, z)$  则是一个随机变量,代表着该过程在时刻  $t$  时的状态。

(4) 当  $(x, y, z)$  和  $\zeta$  都固定时,那么  $S(x, y, z)$  就是一个确定的数值。

统计特性、二阶矩特性、平稳性和各态历经性等是随机函数的基本特征。

随机函数的统计特性可表述为:随机函数是由可数的无穷多个、以  $(x, y, z)$  为自变量的随机变量所组成的,其中的每一个随机变量对应于一个  $(x, y, z)$ 。对一个特定的  $(x, y, z)$ ,  $S(x, y, z)$  是一个随机变量,其分布函数为:  $F(s, x, y, z) = P\{S(x, y, z) \leq s\}$ 。此分布函数依赖于  $x, y, z$ , 它等于事件  $\{S(x, y, z) \leq s\}$  的概率。该事件是在特定的位置  $(x, y, z)$ , 由该函数的样本  $X(x, y, z, \zeta)$  中不超过数值  $s$  的全部结果  $S(x, y, z, \zeta)$  所组成。 $F(s, x, y, z)$  称为随机过程  $S(x, y, z)$  的一阶分布函数。它对  $s$  的导数:  $f(s, x, y, z) = \partial F(s, x, y, z) / \partial s$  是  $S(x, y, z)$  的一阶密度。

## 1.2 蒙特卡罗抽样模拟

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟方法,又称随机抽样或统计试验方法,属于计算数学的一个分支。它于 20 世纪 40 年代提出,是以概率统计理论为基础的、一个非常重要的数值计算研究领域。蒙特卡罗方法又称计算机模拟方法、随机实验技巧或统计实验方法。半个多世纪以来,随着科学技术的发展和计算机技术的出现和发展,这种方法作为一种独立的



方法被提出来。

蒙特卡罗模拟方法的基本原理可以叙述如下：当所要求解的问题是某种事件出现的概率，或者是某个随机变量的期望值时，它们可以通过某种“试验”的方法，得到这种事件出现的频率，或者这个随机变量的平均值，并用它们作为问题的解。这就是蒙特卡罗方法的基本思想。

蒙特卡罗方法通过抓住事物运动的几何数量和几何特征，利用数学方法来加以模拟，即进行一种数字模拟实验。它以一个概率模型为基础，按照这个模型所描绘的过程，通过模拟实验的结果，作为问题的近似解。可以把蒙特卡罗解题归结为三个主要步骤：

- (1) 构造或描述概率过程。
- (2) 实现从已知概率分布抽样。
- (3) 建立各种估计量。

由具有已知分布的随机变量总体中抽取简单子样，也就是在一个确定的分布函数中进行抽样，在蒙特卡罗方法中占有非常重要地位。而判断一个储层地质建模算法是否为随机的，只要看它是否采用了抽样方法。如采用了抽样方法的储层地质建模，即可判定为采用了随机算法。

下面叙述如何对一个随机函数的分布函数进行抽样。

有时，在已知一个随机变量的概率分布的条件下，可获得这个随机变量的一个现实的值，也就是获得随机变量的一个“实现”；通过给定的随机种子的改变，又可以获取一个实现；对于任意多个随机种子，就可以相应获得多个实现。这就是蒙特卡罗抽样的过程。反过来也可利用这些多个实现，获得这个随机变量的概率分布。

下面利用蒙特卡罗模拟方法计算  $\pi$  值的过程，可以展示蒙特卡罗模拟方法应用的一个例子。首先在一个长宽各为 1 的正方形  $A$  内，画一个以坐标原点为圆心，半径为 1 的圆形的  $1/4$  为  $B$ ，如图 1-1 所示。显然， $B$  的面积为  $\frac{1}{4}$  (半径  $\times$  半径  $\times \pi$ ) =  $\pi/4$ 。利用随

机数发生器产生  $[0, 1]$  区间内的均匀概率分布函数连续抽取两个数，就可以看成在  $[X, Y]$  平面上的一个点。这样，就可以利用计算机程序，在区域  $A$  中生成一系列均匀分布的点，而且这些点分别在区域  $B$  和区域  $(A-B)$  中的均匀程度是大致一致的。这些点可能落在图 1-1 的  $B$  中，但也可能不落在  $B$  中，但还在  $A$  的区域中。从点分布的均匀性可以认定，在  $B$  中的点数目是和  $B$  的面积成正比的，而且在  $A$  中点的数目和  $A$  的面积也是成正比的。所以，就有下式成立：

$$\frac{B \text{ 的面积}}{B \text{ 中点的数目}} = \frac{A \text{ 的面积}}{A \text{ 中点的数目}}$$

又由于  $A$  的面积显然为 1，因此  $B$  的面积等于：

$$B \text{ 的面积} = \frac{B \text{ 中点的数目}}{A \text{ 中点的数目}}$$

由于  $B$  的面积为  $\frac{\pi}{4}$ ，所以  $\pi = 4 \times (B \text{ 中点的数目} / A \text{ 中点的数目})$ 。这样，就利用蒙特卡罗模拟计算获得了圆周率  $\pi$ 。当然，所取点的数目越多，计算所得的圆周率值的有效数字就越多，精度也就越高。

在图 1-1 中，区域  $A$  和区域  $B$  中所具有点的数目的比值，可以视为随机变量。

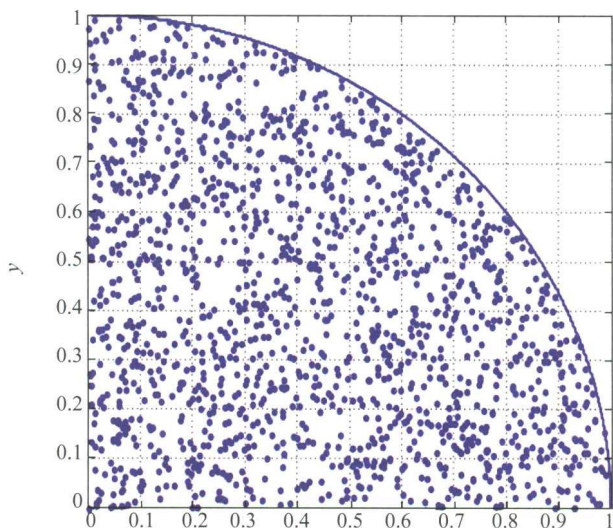


图 1-1 利用蒙特卡罗模拟计算圆周率  $\pi$

前述利用蒙特卡罗模拟计算圆周率  $\pi$  的例子，是通过在边长为 1 的一个正方形  $A$  中随机地产生若干个点，统计落入区域  $A$  中的点的个数和落入区域  $B$  中点的个数，最后两者相除则可获得圆周率  $\pi$  的一个近似值。这种通过随机数求得一个确定的数值的方法，看起来好像有点不好理解，但这恰好是蒙特卡罗方法的魅力所在，也正是这种方法应用范围如此之广的根本原因。实际计算结果说明，当落入  $A$  的点数达到 1000 时，所获得的  $\pi$  的有效数字会达到 3 位。不容怀疑，当落入  $A$  的点数达到 10000 或 100000 时， $\pi$  的有效数字会更多。

以下有关章节中，将对蒙特卡罗方法进行进一步的叙述。

### 1.3 建模的不确定性研究的进展

在 2011 年出版的由 Y. Zee Ma 主编的 AAPG 论文集“不确定性分析与储层建模” (Maand other, 2011) 中对不确定性做了详细的研究。

在有关文献中，不确定性有好几个含义。它可能指的是有关一个变量的知识欠缺，或

者是数据的不准确或不明确，或者是变量的不确定、不定或不可预测。概率理论是对不确定性进行描述的一个自然语言，因为它可以对不确定性进行定量表示和分析。

一般来说，可以将不确定性分为偶然发生的不确定性和认识方面的不确定性。

偶然发生的不确定性是数据或过程中固有的不确定性，通常被称为随机不确定性。一个偶然不确定性的例子是预测一枚硬币出现正面还是反面——即使再多的额外数据或认识都不会改变这一不确定性。

斯坦福大学著名地质统计建模专家 Jef Cares 在 2011 年出版的《在地球科学中不确定性建模》的专著中，利用科学的语言论证了什么是不确定性、不确定性的来源、确定性建模、不确定性模型、模型与数据关系、从贝叶斯定理的角度看不确定性、模型的证实与证伪以及模型的复杂性问题。他的研究视野从储层地质建模范畴，已经延伸扩大到地球科学的领域。

近几年来，国外在储层地质建模有关的不确定性研究方面，不仅方法上有了不少创新，在研究内容方面更是向着油田开发的纵深方向发展。

在 2010 年以后发表的文献中，一些题目值得详细加以列举。例如：“油藏预测优化—地质统计学、油藏建模、非均质性和不确定性的影响”（2011, SPE 145721），“不确定的产量预测因子：3D 油藏建模的远景”（2014, IPTC 18196），“利用特征选取的油藏建模：核心学习方法”（Demyanov and others, 2011），“在静态油藏建模和开发加密井部井中降低不确定性的新技术”（Mahmoud, 2015），“致密气藏的建模和不确定性评价”（Khouri and others 2015），“复杂油藏的综合建模和不确定性估计”（Anyanwu, 2015）。

在这些文献中，把产量预测的不确定性和储层地质建模联系起来，把油藏预测优化和油藏建模以及不确定性影响联系起来，把静态油藏建模和加密开发井的不确定性分析联系起来。它们所提出的进行不确定性分析的概念、思路和方法如下：

Meddaugh (2014) 在综合研究地质统计学、油藏建模、非均质性和不确定性的基础上，提出了油气产量预测的一个方案。提出产量最优预测的一种主要来源是地层内原始的氢烃体积估计的偏差，另外一个偏差是由于数目有限的数据采样。可以通过统计学方法，通过使用合适的基于不确定性的流程，同时通过合理的不确定性估计降低这些偏差。油气体积的显著偏差的一种附加来源是随机油藏参数模型的运用。

Yemez 等人 (2014) 认为，基于油藏建模研究项目所提供的经验，公开发表的文献和石油工业界的经验，影响产量预测的若干关键要素是：稀疏又缺乏代表性的数据，原始油气的带有偏差的估计以及油藏模型中缺乏代表性的输入数据的概率分布。产生这些要素的原因是缺乏地质模型的概念、不合格的静态和动态模型、地震数据的错误运用、不恰当模拟的使用、历史拟合校正过程的不唯一性以及不适合地使用不确定性分析流程和工具。

Demyanov (2011) 认为，很多算法能够自动产生多个历史拟合的油藏模型，然而，不能保证对油藏描述作出的变化，以取得一个历史拟合所匹配的地质特征。该文献提出了一个新颖的数据驱动的油藏物性参数空间分布的建模方法。它应用一个先进的多核学习方法 (Multiple Kernel Learning, MKL)，并对多尺度的地质特性进行整合，测量获得的油藏属性和先验知识融入一个智能化的方法，以便改善油藏模型的实现。

## 参考文献

- 霍春亮, 刘松, 古莉 等.2007.一种定量评价储集层地质模型不确定的方法 [J].石油勘探与开发, Vol.34, No.5: 574-578.
- 李少华, 张昌民, 彭裕林 等.2004.储层不确定性评价 [J].西安石油大学学报 (自然科学版), 19 (5): 16-19.
- 尤少燕, 时应敏, 乔玉雷.2005.利用多尺度资料进行油藏地质建模 [J].油气地质与采收率, 12 (3): 15-17.
- 王家华 等.1999.克里金地质绘图技术.北京:石油工业出版社.
- Ma Y.Zee and other (Edit.).2011. Uncertainty analysis and reservoir modeling: development and managing assets in an uncertainty world. AAPG Memoir 96.
- Massonnat G.J.1999. Can we sample the complete geological uncertainty space in reservoir-modeling uncertainty estimates? SPE 59801.
- Mahmoud, Salah El Din Ragab.2015. A Novel technique for reducing uncertainties in static reservoir modeling and development infill well placement. SPE-175331-MS.
- Yemez, I. and others.2014. Factors contributing to uncertain production forecasts: 3D reservoir modelling perspectives. IPTC-18196-MS.
- Meddaugh, W. Scott.2011. Reservoir forecast optimism-impact of geostatistics, reservoir modeling, heterogeneity, and uncertainty. SPE 145721.
- Demyanov V. and others.2011. Reservoir modelling with feature selection: A kernel learning approach. SPE 141510.
- Khoury Philippe Al and others.2015. Reservoir modeling and uncertainties evaluation of a tight carbonate reservoir in offshore Abu Dhabi. SPE-177823-MS.
- Meddaugh W. Scott and others.2011. Reservoir forecast optimism-impact of geostatistics, reservoir modeling, heterogeneity, and uncertainty. SPE 145721.
- Anyanwu Chinedu and others.2015. Integrated reservoir modeling and uncertainty assessment of a Reservoir Complex in the Niger Delta. SPE-178277-MS.
- Yemez I. and others.2014. Factors contributing to uncertain production forecasts: 3D reservoir modelling perspectives. IPTC-18196-MS.
- Demyanov V. and others.2011. Reservoir modelling with feature selection: A kernel learning approach. SPE 141510.



## 2 多点地质统计学算法原理及其 河流相储层建模

本章的内容以委内瑞拉 MPE3 地区的辫状河储层的建模过程为例，在回顾两点地质统计学建模发展的基础上，论述了多点地质统计学建模算法的原理以及在 MPE3 地区辫状河储层建模的应用。为此，针对辫状河储层的地质知识库构成及其训练图像的制作进行了阐述，为全面理解多点地质统计学建模的原理作了必要的铺垫。

### 2.1 两点建模到多点建模

人们已经熟知，变异函数是以空间变量在每两点的数值为基础的一种统计量。这两个点的数值，即是空间变量  $z$  在点  $u$  和  $u+h$  处的两个值  $z(u)$  和  $z(u+h)$ 。与多点地质统计学建模不一样，两点地质统计学是指利用变异函数作为基础的地质统计学，也即利用变差函数描述空间变量的相关性和变异性，通过建立在某个方向上两点之间的空间变量的变化关系来描述空间的变化特性。其中，包括了序贯指示模拟、序贯高斯模拟、截断高斯模拟和各种克里金估计方法。从两点地质统计学向多点地质统计学的演化，显示出地质统计学的理论体系有了很大的发展，其应用效果有了明显改善。

利用各井测井数据，以地质统计学为基本原理进行油藏描述和储层建模的方法一出现，便受到业内人士的一致欢迎，形成了一股巨大的潮流，极大地推动了油气田开发。整个储层空间中，只有测井数据可以视为是准确的，而全部网格块处的建模结果，都是根据各种统计算法和建模算法推断出来的，其测井数据所在网格块的数目只占储层空间全部网格块的十分之一或百分之一，显得远远不足，是一种十分粗糙的估算。为此，人们提出利用随机函数的方法、局部估计的概念以及最佳线性无偏预测，以增加可用的信息量。在地质统计学发展的初期，为了对空间变量的分布进行建模或模拟，人们的注意力集中在如何对有限的测井数据进行深入细致的分析，以抽取所研究的空间变量的相关性和各种空间变异性。实际上，初期的地质统计学的根本目的就是估计出储层空间中各网格块的相关性和