



国外地质模型与油藏管理丛书

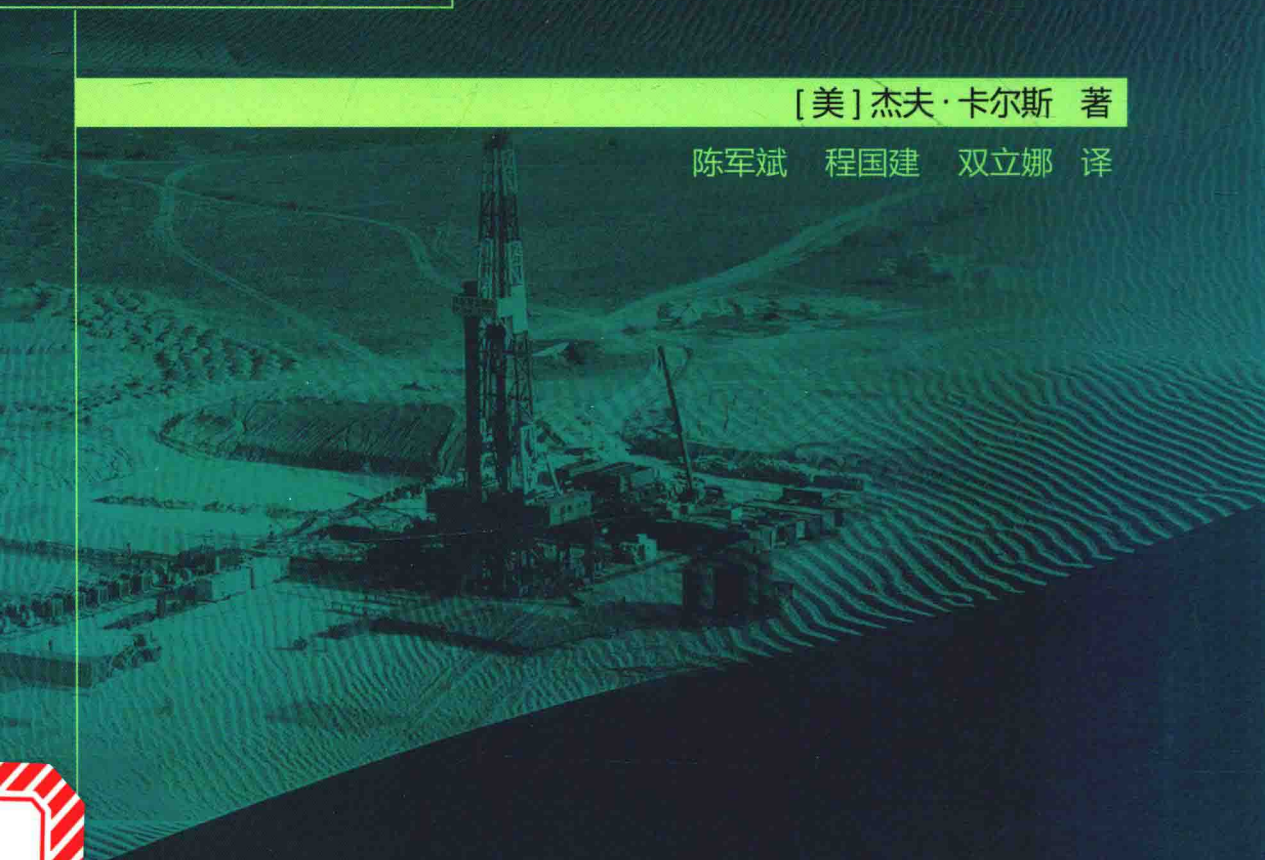
石油地质统计学



PETROLEUM GEOSTATISTICS

[美] 杰夫·卡尔斯 著

陈军斌 程国建 双立娜 译



石油工业出版社

国外地质模型与油藏管理丛书

石油地质统计学

[美] 杰夫·卡尔斯 著
陈军斌 程国建 双立娜 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要从实用性角度介绍历经验证的地质统计学工具, 以及如何使用这些工具以最合适的方式应用于全局油藏建模。主要内容包括地质统计学在油藏建模中的作用, 连续性地质建模, 构建高分辨率地质网格模型, 受地质条件约束的地质统计学历史拟合方法, 不确定性建模等内容。

本书可供涉足本领域的专业技术人员以及石油院校相关专业师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油地质统计学 / [美] 卡尔斯著, 陈军斌, 程国建, 双立娜译.
北京: 石油工业出版社, 2014.6

(国外地质模型与油藏管理丛书)

原文书名: Petroleum Geostatistics

ISBN 978-7-5183-0200-0

I. 石…

II. ①卡…②陈…③程…④双…

III. 石油地质学 - 地质统计学

IV. ① P618.130.8 ② P628

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 120009 号

All Rights Reserved. Translated from the English by the Petroleum Industry Press with permission of the Society of Petroleum Engineers. The Society of Petroleum Engineers is not responsible for, and does not certify, the accuracy of this translation. 版权所有, 美国石油工程师学会许可石油工业出版社翻译出版。石油工程师学会对译作的准确性概不负责。

著作权合同登记号 图字: 01-2014-3624

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.cn

编辑部: (010) 64523562 发行部: (010) 64523620

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

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 6

字数: 103 千字

定价: 30.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《国外地质模型与油藏管理丛书》

编 委 会

主 任：屈 展

副主任：方 明 肖忠祥 陈军斌 程国建

主 审：屈 展 方 明

编 委：陈军斌 程国建 肖忠祥 章卫兵

王俊奇 韩继勇 张 益 林家恩

魏新善 曹 青 闫 健 张国强

双立娜 李小和 刘 烨 李 中

译者前言

随着高新技术的发展及管理理念的更新,进入 21 世纪的油气工业面临诸多挑战,如从定性地质构造观察到定量建模描述、从微观结构分析到油藏三维可视化展布、从历史拟合到油藏自动监测、从分散管理到集成式优化管理、从单一数据源到多异构数据体的大规模集成应用等。这些转型的根本目标还是油气生产率的提升以及对安全环保等因素的考量,为了应对这些挑战,西安石油大学组织专家、学者翻译了 8 本相关外文原版专著,形成《国外地质模型与油藏管理丛书》,本套丛书各分册为《集成油藏资产管理——原理与最佳实践》、《油藏流线模拟——理论与实践》、《实用地质统计学——SGeMS 用户手册》、《地球科学中的不确定性建模》、《石油地质统计学》、《岩石物理特性手册》、《油藏模拟——历史拟合及预测》、《油藏监测》,本丛书受到西安石油大学出版基金和“西部低渗—特低渗油藏开发与治理教育部工程研究中心”、“陕西省油气田特种增产技术重点实验室”基金资助。

由于译者专业知识及外文水平所限,难免在原文理解、语义阐释、文字表达方面不够准确,甚至出错,诚恳希望读者朋友多提宝贵意见和建议。联系方式:西安石油大学数字油田研究所, dofi@xsyu.edu.cn。

译者

原 书 前 言

本书与其他关于地质统计的书有所不同，本书重点并不是提出一种解析、推导的认识。在本书中，并没有尝试解释地质统计的算法和变量的计算或模拟，也没有对地质统计地震数据集成方面提出详细的内容。本书重点在于对一些常用地质工具的介绍，包括其功能、优点以及如何应用于全球油藏模拟中。因为理论方面的描述会分散读者对这些方法在应用方面的注意力，所以本书中对理论的介绍较少。而一些“深入阅读”提供了对理论方面进一步认识的机会。“建议阅读”部分，总结了每章部分参考文献的列表，包括论文和推荐的常见书籍，对这方面有兴趣进一步研究的读者，可以把其内容作为参考。

我要感谢很多人。首先，我要感谢的是我的同事和导师，Andre Journal，多年来我从他那里获益匪浅。Andre Journal 在这个领域的贡献是不可估量的。他的严格给我提供了不竭动力，他的建议使我坚持不懈，这些都非常重要，使我避免误入“死亡算法”的误区，他为本书提供了巨大的帮助。其次，我也要对两位 SPE 委员会成员表达感谢，他们是 Hossein Kazemi 和 Marco Thiele。特别是 Marco Thiele，他的观点简明而清晰，这些观点对读者来说更具有易读性。再次，我要特别感谢 Khalid Aziz, Emmanuel Gringarten 和 Ricardo Olea 在审阅本书时所提的意见。Emmanuel Gringarten 同时编写了本书第五章。另外，我想要感谢 Guillaume Caumon, Petter Abrahamsen, Ragnar Hauge, Alister McDonald, XianHuan Wen, Sebastien Strebelle, Todd Hoffman 和 Inanc Tureyen 对本书中提供的图件等数据。我要感谢斯坦福油藏预测中心项目组机构成员陪伴和支持。没有他们，本书不可能完成。

我把这本书献给我的家人，特别是我的父母，感谢他们无私的关爱与支持。

杰夫·卡尔斯

加利福尼亚州斯坦福大学

目 录

1 地质统计学与油藏建模	1
1.1 油藏建模的意义	1
1.2 3D油藏建模	2
1.3 模型构建中的层次性	5
1.4 地质统计学的概念	8
1.5 估计与模拟的关系	12
1.6 地质统计学在油藏建模中的作用	14
2 连续性地质建模	17
2.1 概述	17
2.2 相描述	18
2.3 用变差函数描述地质构造的连续性	21
3 构建高分辨率地质网格模型	31
3.1 概述	31
3.2 构造建模	32
3.3 相建模	35
3.4 基于网格的模型	38
3.5 物性建模	44
3.6 采用地震数据	47
3.7 受地震体约束的物性模型	50
4 受地质条件约束的地质统计学历史拟合方法	54
4.1 概述	54
4.2 使用细化步骤的历史拟合	57
4.3 使用粗化方法的历史拟合	63
4.4 确保地质一致性的修正方法	65
5 不确定性建模	71

5.1 不确定性的概念 71

5.2 全局参数不确定性评估 74

5.3 一个综合的不确定性建模工作流程 84

1 地质统计学与油藏建模

1.1 油藏建模的意义

在一个成熟油田中，从发现这个含油气盆地到采出最后一滴石油，油藏建模在了解和预测油藏的各个关键因素，比如地质统计成因、地球物理特性及工程学因素方面都扮演着重要角色。油藏建模对所建模型的分析程度和复杂性是由实际勘探、油藏评价和油藏工程等问题连续驱动的，而非独立于其外。好的建模实践总是关注其最终效果，无论是对原始石油地质储量（OOIP）的估计、最佳井位的确立、地面设备的配置、二次采油及提高采收率方法的设计，还是对水窜的预测等方面均是如此。

建模有许多好处，最重要的是它是一种能够结合不同领域的专家意见并能够集合各种资源数据的理想方法。这种方法能够从现有资料中挖掘出有价值的相关信息（对每个处理的目标是不同的）。

我们很难知道地下的真实情况，油藏模型也仅仅起到模拟的作用。因此只能通过一些测量手段（如测井、地震勘测或者岩层测试）间接和不完全地了解复杂和非均质的地下情况，而很难完全了解。对地下情况的这种未知，使得建模人员只能通过现有数据来模拟未知数据。然而模型解释出的数据是不能被现实情况印证的。主观性在油藏建模中是不可避免的，然而它也提供了增加专家意见的机会，即建模中充分地利用现有的数据，又允许模型去超越。

油藏建模对 3D 建模统计学的一个重要贡献是它使得建模人员必须做出清楚的、准确的主观模拟分辨。如图 1.1（a）所示，其目标是从 5 口井获得的孔隙度测量数据之间进行插值。常用的插值算法可以给出图 1.1（b）中的结果。然而，图 1.1（c）到图 1.1（e）却给出了另外一种方法，而这种方法正是从本书中所描述的各种各样的统计学方法中得来的。所有的模型都适合这些数据，并且在这些数据附近产生一定程度的连续性。然而，每一个模型均以不同的地质连贯性形式展现。无论是隐含的或者明确的，每种模型都对应一种关于油藏

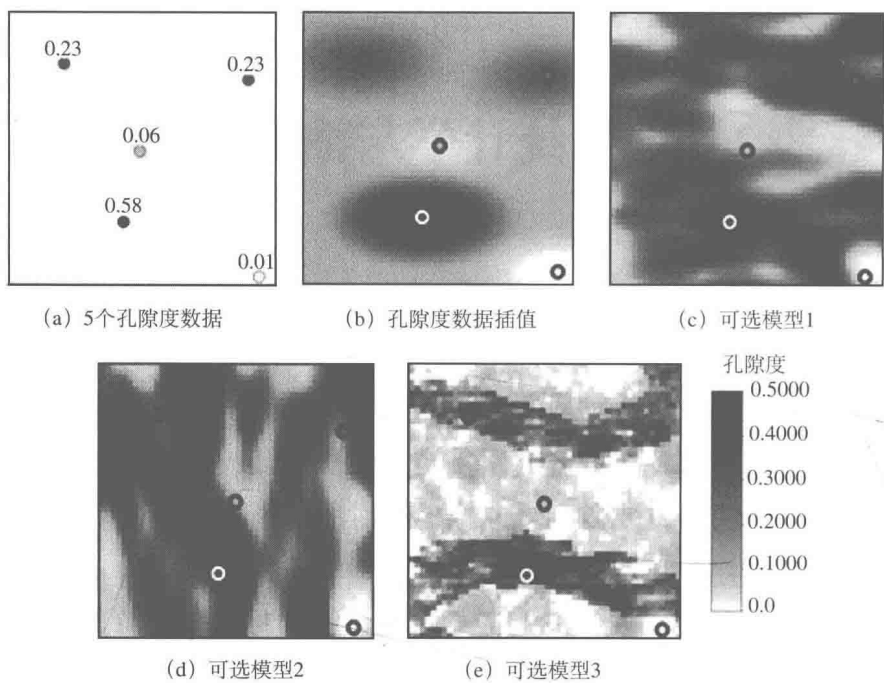


图 1.1 不同插值方法所得结果

连续性情况的表述。因此，选择一种特殊的插值算法，不仅仅意味着将 5 个孔隙度数据添加到最终模型。在这里应用到一个关于空间连续性的解释。使用内插工具包中隐含的连续油藏类型，它的结果不亚于显式指明其为连续性模型，其目的是拟合数据。也不存在通用的标准来判断图 1.1 中 4 个模型哪一个最能精确地反映地层的非均质性。

在本书中，这种假定的样本数据和非样本数据的关系（或者假定的地质连续类型）被称为连续性地质模型。

1.2 3D 油藏建模

1.2.1 油藏数据

三维油藏模型涉及广泛的专业知识领域，地质统计学是其中几个关键组成部分之一。3D 建模的目标是给出一个或多个可供选择的 3D 数字模型，旨在描述那些地质学的、地球物理学的和地下油藏工程方面即将面临的重要研究目标。这些数字模型用来评估主要的油藏参数，如石油地质储量、预测产品性能，必要时提供不确定性描述。

油藏建模需要用到很多数据资源，本书中有以下几类：

(1) 地质资料：涉及地质沉积作用类型的各种数据。

①岩心数据——孔隙度、渗透率和各相的相对渗透率。

②测井曲线数据——表征岩性、岩石学和井眼流体类型的任意一组曲线。

③沉积学和地层学解释。

④对地表岩层的模拟数据。

(2) 地球物理学数据：源于地震勘测的各种数据。

①三维地震区域的地层和断层的说明。

②地震属性。

③岩石物理学数据。

④带延时的四维地震数据。

(3) 油藏工程数据：涉及油藏测试和生产的任何数据。

①压力、体积、温度 (PVT) 数据。

②试井数据。

③生产数据。

3D 油藏模型是利用油藏知识建立的。这个知识资源是油藏数据和专家对这些数据的解释。模型的建立正是基于这两种资源的结合。

1.2.2 测量尺度、建模尺度及误差尺度

3D 建模的一个目标是重现油藏特性的三维空间变化。从孔隙范围到盆地范围都存在非均质性。完整的 3D 模型可以给出大型断层、小型裂缝、分层、大型岩性变化，以及油藏渗透性、孔隙度和饱和度的全面 3D 描述。理论上，完整的 3D 模型能提供最高可能性的分辨率。这实际上不可能建立，也没有必要建立非常详细的油藏模型。详细地建造渗透性空间可变性模型并非建模本身的目标，它经常与一些特定需要解决的油藏工程问题相关。

上述列出的各种数据资源说明了油藏在不同范围的精度（图 1.2）。某些观察的范围是容易理解的（如岩心的物理维度）；其他范围可能有一个变量或者未知的范围，或者需要解释的范围（如试井数据和生产数据）。3D 油藏建模的一个主要挑战是将所有数据带入一个单一的数字模型中，每个数据都在其自己的信息范畴内。这样比仅使用一个观察范围来建立油藏模型要相对简单（如仅使用地震数据建模）。这种方法将忽略或者至少限制不同观察范围的其他数据的

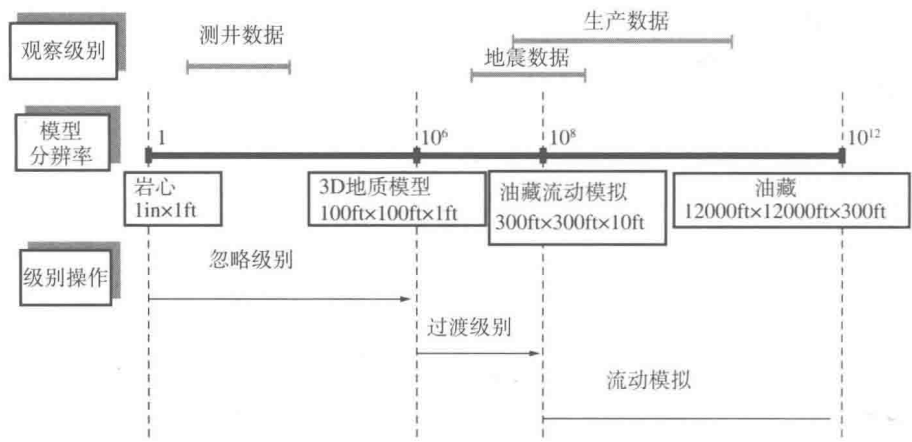


图 1.2 观察级别对比、地质网格模型和油藏流式模拟模型以及不同模型间操作的典型分辨率

(参考单元级别/分辨率是岩心支撑。如果这个参考分辨率属于 1 级,那么 3D 地质网格模型属于 6 级,油藏流动性模拟模型属于 8 级,整个油藏属于 12 级或者更大。测井曲线、地震和生产的观察级别只能预示)

贡献。鉴于数据多范围、多程度准确度的要求,真正的挑战是要同时应用所有数据。

任何三维建模都是在一个具有一定尺寸的网格上进行,即模型分辨率。这种分辨率(在地质统计学中又被称为体积支持)可被简单地定义为组成 3D 数字模型的单个网格单元的大小。一旦网格大小发生改变,分辨率可定义为典型的或者平均网格单元大小。如果简单地包含岩心和测井曲线的小规模数据,通常在高分辨率网格上建模。然而,给出岩心大小,即使一个小的油藏也需要几十亿个网格单元以允许模型网格中直接包含岩心数据。网格单元的大小比最小规模数据的维数要大很多,从而可考虑产生所谓的高分辨率的 3D 地质网格模型(图 1.2)。这意味着在单个高分辨率网格单元中的精密标度的非均质性会被忽略。任何单独的岩心尺寸都被假定为它所处全部网格单元的典型。误差比例存在于精密测量比例和模型分辨率中间。误差比例通过暗含的按比例增加的岩心数据来隐藏网格单元的维度,按比例增加包括 4 ~ 5 个数量级(图 1.2)。目前大多数 3D 模型忽视误差比例或者通过各向异性的渗透性进行粗糙地、隐含地建模 ($K_v : K_h$ ^①)。

① K_v 为垂直渗透率, K_h 为水平渗透率。

地质网格模型的维数取决于研究目标和现有资料。以沿着直井的采样测井曲线为基础,垂直维度选取为 $1 \sim 3\text{ft}^{\text{①}}$ 。以 3D 地震分辨率为基础,根据油藏的大小、井的数量和详细需求的级别,通常选取大约 100ft 的水平分辨率。高分辨率的数学模型通常包括 1 亿 $\sim$ 5 亿个网格单元,这取决于油藏的大小、井数和所要求的细节水平。

1.3 模型构建中的层次性

1.3.1 构建高分辨率 3D 地质网格模型

假设油藏中存在不同规模的非均质性和不同数据资源间的规模差异,则可使用一种分级的方法来构建 3D 数字模型。图 1.3 给出了构建高分辨率 3D 地质网格模型的流程图。具体步骤如下:

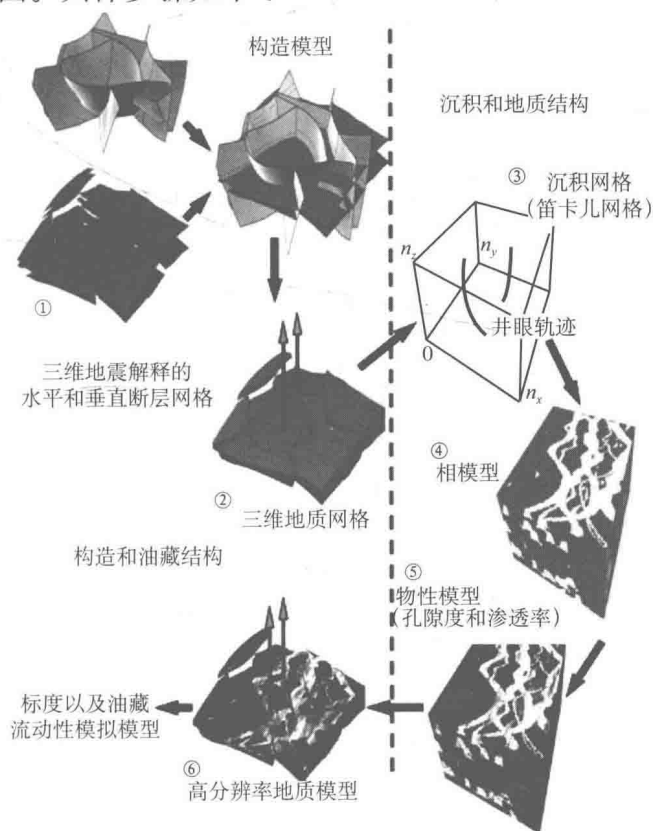


图 1.3 按流程构建高分辨率 3D 地质网格模型

① $1\text{ft}=0.3048\text{m}$ 。

第一步：以平面和断层的形式建立油藏的主要几何形状和构造。平面和断层的位置由三维地震数据和钻井者决定。

第二步：由先前的构造框架建立一个三维地层网格。该网格是不均匀的或者结构化或非结构化的。

第三步：根据地层网格建立笛卡儿网格，理想化为原始沉积环境。该网格为原始的沉积环境提供了坐标系统。在笛卡儿网格和地层网格中的每一个网格单元中间建立一对一的关系，将所有的数据，例如，井轨迹、井坐标以及三维地震数据，输入笛卡儿网格中。

第四步：笛卡儿网格由岩相类型得到普遍化。露头数据和沉积相模型以相构造的方式提供信息；在这些相类型的空间分布上，测井数据、岩心以及地震资料数据提供局部约束。

第五步：在每一个相类型中，以测井数据和岩心数据为基础，孔隙度被赋值到笛卡儿网格的每一个网格单元，这样就从孔隙度模型得到三维渗透率模型。孔隙度经常要首先确定，这是由于孔隙度数据更加可靠，并且比渗透率数据更丰富。

第六步：岩石物理属性被映射到地层网格，以提供一个高分辨率三维地层微元模型。

地质统计方法经常应用于笛卡儿网格中（如在原始沉积环境中）。利用这种方法，可以解释当时沉积环境下的地质形态和面积，以及褶皱和断层的间隔距离。从一个复杂的包含断层、褶皱和侵蚀作用的构造模型中建立笛卡儿网格并非一件容易的事情，本书并未阐述该方法。

1.3.2 生产数据处理方法

图 1.3 中缺乏生产数据和它们在油藏模型中的位置。工程措施不能基于不拟合生产数据的数值模型。生产数据为最终模型目标提供直接观测值：油藏流动性。任何将生产数据集成为三维数据模型的方法都将调用流模拟器。然而，流模拟器在解决地质网格模型分辨率问题时并不可行。

由油藏特性模型粗化为基于流模拟器的网格分辨率组成的当前实践是可行的，这个三维数据模型以油藏流动性模拟模型的形式表示。接下来，这个粗化模型被修正直到它匹配生产数据。虽然该方法可以达到拟合历史生产数据的目的，但是它并不能完成前面所说的真正挑战，即将所有数据同时整合到单一的

数值模型中。在这个传统方式下，将以不匹配历史数据的地质连续、高分辨率地质网格模型和不匹配历史数据地质不连续油藏流动性模拟模型终止。非均质性在本书中将予以详细说明。

1.3.3 术语阐释

由于本书所述内容涉及许多学科交叉，读者可能会对一些常用的诸如模型、网格或者垂直比例尺、分辨率等词汇产生困惑。该章节简要地介绍了在本书中用到的一些术语，并且指出了它们在其他一些学科的解释。

高分辨率地质网格模型（简称地质网格模型）：代替属性模型、地质统计模型、地质模型使用。

分辨率与比例：分辨率被简单定义为两个相邻网格单元间的距离；比例以抽象的形式应用，例如在观察比例中应用。因此，比例与模糊概念有关。由于上述原因，高分辨率代替了精细比例，而粗化模型比笛卡儿模型更好。

构造模型：指断层和平面的布置。

支撑体积：物理体积由已知的特定数据表示。岩心塞的支撑体积被准确确定，它与地震属性的支撑体积相反。

三维地层网格：根据构造模型建立的网格，可以叠层，同时可以存在尖灭，并且可以由任意类型的网格单元组成。在大多数情况下，一个逻辑矩形网格，即“ i, j, k ”网格，在构造模型周围建立。

油藏流动性模拟模型：由高分辨率地质网格模型粗化的三维网格，包含油藏属性（岩石物性、饱和度及流体接触）。为了达到流体流动性模拟的目的，油藏流动性模拟模型也应该包括所有与流体相关的信息（例如，流体的物理属性、有限差分/元实现及PVT属性等）。本书中，油藏流动性模拟只与网格和它的岩石物理属性相关。

文中大量用到了“相”这个词，作为岩石类型（例如，砂岩、页岩、泥岩），或者作为构造元素（例如，河道、裂缝、冲积堤）。河道由砂岩层和泥岩层组成，这样将产生岩相与沉积相之间的区别。然而，它们的地质统计处理是类似的，因此，我们在文中用到相这个词。根据地质统计的观点，相决定了基于统计规则的一种分配（例如，渗透率、孔隙度统计）。

1.4 地质统计学的概念

在表述建立地质模型中地质统计学的作用之前，我们来讨论一下地质统计学的意义。

正如在连续不断的发展过程中各种学科的应用，地质统计学只是一个简明的定义而非一个简单的存在形式。同样，这门学科以及其背后中被完整建立起来的理论不应该与在三维油藏模型中发展起来的特定算法相混淆。然而，可以尝试用如下定义：

从广义来讲，地质统计学可以被定义为研究空间、时间现象的统计科学的分支以及研究空间关系来模拟未观察到、未取样地区的数值或者变量值。

地质现象的非随机化要求相近的测量值比差别大的测量值更类似。换句话说，空间关系存在于这些值之间。在地质统计学中，空间关系描述可靠数据和未知变量之间的不同关系。数据可以是多种类型，可能与估计的变量形式不同。因此，为了应用地质统计学，必须首先要确定通过地质连续模型得到的空间关系的数量。最简单的定量评价可通过评估任意在点 $u = (x, y, z)$ 测量的数据值与 h 距离之外任意测量值之间的相关系数，倘若不同距离 h 下的相关系数将产生

方差图，亦即是本书中所讨论的模型之一。

观测到的在不同位置获得的数据样本之间的相关性由基础地质现象的空间连续性（非随机性）引起。这种关系使得我们能够解决一个空间估计典型问题，即估计一个未取样值，考虑到同一个变量的一些相邻样本值（如孔隙度，见图 1.4）。在线性地质统计学中，在未取样点 $u = (x, y, z)$ 测得的值 $z^*(u)$ 是 n 的关联数据 $z(u_\alpha)$ 的线性组合。

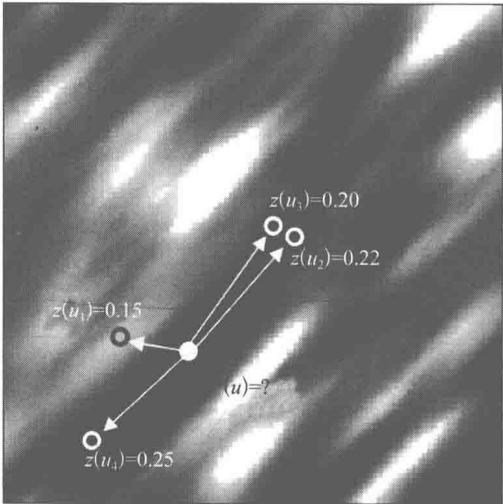


图 1.4 基本地质连续性决定了对 u 处的未知估计（位置 u_2 数据未知估计的相关性比它与在位置 u_1 相关性更好。同样， u_2 和 u_3 有一个是多余的）

$$z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} z(u_{\alpha}) \quad (1.1)$$

式中 u ——具有三维坐标 (x, y, z) 的位置；
 $z(u_{\alpha})$ ——在位置 u 上的未知属性；
 $z^*(u)$ ——在位置 u 对未知属性 z 的估计值；
 λ_{α} ——克里金权重。

下面提出两个关键问题：

(1) 平稳性的决定：要用哪个数据估计未知 $z(u)$ ？图 1.4 中决定汇集哪些数据用来提供评估 $z^*(u)$ ，以地质统计学形式描述即平稳性决定。它并非指在特定位置 u 估计孔隙度，并且以源自油藏中完全不同地质特征的不同层或断块的数据为基础（因此是孔隙度）。数据必须具有相似的统计属性。然而，应该避免将每一个独立数据值独特化。数据源的某种形式对实施统计方法是必要的。

(2) 如何确定权值 λ_{α} ？一些问题需要确定权值 λ_{α} 。我们在此不考虑数学运算，而是列出决定这些权值的两条引导原则：

① 基本地质连续性使那些更接近目标位置 u 的数值 $z(u_{\alpha})$ 比那些离得远的数据更信息化。因此，邻近的数据应获得更多的权值。如果假设任何一个与 U 具有一定距离的数据应该获得相当于 0 的权值。余下问题的解答在于“邻近性”的定义。类似于 u 与 u_{α} 的欧几里得距离的简化定义距离应该忽视地质连续性的特殊性。为了解释这个问题，举例见图 1.4。尽管在 u_2 点的数据比点 u_1 的数据与未知点 u 的数据相比相差更远，但是，明确的对角线联系性使在点 u_2 的数据更具信息性。通过逆距离权衡决定的权值不能解释为关于空间连续性的任何优先信息。地质统计学的一个重要贡献就是它将关于空间连续性的信息结合成为从式 (1.1) 类型模型获取的估计值。

② 互相接近彼此的样本数据值在某种情况下是多余的：因此，这样一组数据的数值与相同距离的孤立的数据相比并不更具价值。考虑图 1.4 的情况，基础空间连续性使在点 u_2 和点 u_3 的样本值具有很大的相关性；因此，它们在未知点 u 产生了冗余数据。这些数据应该“共享”它们的权值来决定点 u 的非样本值，在点 u_4 的独立数据值不需分享它的权值，因此，它将占有比在点 u_2 更大的权值。所研究的任何关于变量的基础空间连续性的信息是决定权值 λ_{α} 的决定性