



# 油气储层地质学基础

## Basis of Hydrocarbon Reservoir Geology

于兴河 教授 博士生导师

中国地质大学（北京）能源学院石油教研室

Tel: 82320109 或 82321857 (O)

Email: [billyu@cugb.edu.cn](mailto:billyu@cugb.edu.cn)





# 第九章 储层地质建模

第一节 基本概念与模型类别

第二节 储层建模的数理基础

第三节 储层建模方法

第四节 储层建模的程序与具体步骤



# 第九章 储层地质建模

建立储层地质模型是油藏描述和储层表征最终成果的具体体现，也是当前油气储层地质学研究的核心内容与前缘。本章着重介绍储层地质建模概念、模型类别，并对储层建模的数理基础、基本原理、主要方法、具体实现步骤以及研究策略进行了介绍。

## 第一节 基本概念与模型类别

- ▶ **储层研究的目标：** 即是建立定量的三维储层地质模型。也是油气勘探开发深入发展的要求。
- ▶ **三维储层建模的目的：** 运用不同阶段所获得的相应层次的基础资料，建立不同勘探开发阶段的储层地质模型，精确地定量描述储层各项参数的三维空间分布，为油气田的总体勘探取向和开发中的油气藏工程数值模拟奠定坚实的基础。



# 第一节 基本概念与模型类别



## 一、基本概念

### (一) 定义

- **地质模型**是指能定量表示地下地质特征和各种储层（油藏）参数三维空间分布的数据体。
- 现代油藏管理的两大支柱是**油藏描述**（储层表征）和**油藏模拟**。油藏描述的最终结果是**油藏地质模型**。
- 完整油藏地质模型包括：**构造、沉积、储层及流体等模型**。
- **油藏地质模型的核心**：储层地质模型，主要是指储层骨架模型和储层参数模型。



# 第一节 基本概念与模型类别



## (二) 储层地质模型的优点

- 更客观地描述并展现储层各种属性的空间分布，克服了用二维图件描述三维储层的局限性。有利于油藏工程师进行合理的油藏评价及开发管理。
- 更精确地计算油气储量。储量的基本计算单元是三维空间上的网格（分辨率比二维高得多），每一个网格均赋有储集体（相）类型、孔、渗、饱等参数。因此，通过三维空间运算，可计算出实际的含油储集体（砂体）体积、孔隙体积及油气体积，其计算精度比二维储量计算高得多。
- 有利于三维油藏数值模拟。油藏数值模拟成败的关键在很大程度上取决于三维储层地质模型的准确性。



# 第一节 基本概念与模型类别



## (三) 方法

- 现代油藏描述中建立储层地质模型，放弃了传统的以等值图反映储层参数的办法，把储层**网格（块）化**，先建立“井模型”，并能通过单井资料的层位（小层）划分与等时性对比建立“层模型”，进而将各个网格赋以**各自的地质参数值**来反映储层参数的三维空间变化，即得到储层的“参数模型”。
- **储层模型的精度取决于：储层网格尺寸、属性量值的精度。**

## (四) 模式与模型

- **模式**是对研究对象的总体概括，强调的是外观形体，其目的是解释其成因机制；模式为定性描述，具有指导后续研究和借鉴的作用——用于临摹；
- **模型**是对研究对象的具体刻画，强调的是内部属性，其目的是定量表征其特征与变化。模型为定量研究，作用是设计方案——用于实施，具有直接和选择使用的价值（于兴河，2002）。



# 第一节 基本概念与模型类别



## 二、模型分类

常见储层地质模型的分类一览表

分类依据		分类结果			模型的作用与特征	
		大类	细分			
不同研究阶段与任务		概念模型			勘探阶段与开发早期	
		静态模型			开发中期	油藏描述或储层表征
		预测模型			开发后期	
表述内容与属性	离散型	骨架模型	沉积(相)模型	亚相模型、微相模型	结构模型(储层非均质)	有效储集相带空间展布特征
			储集体(砂体)模型			储层的连通与叠置型式
			流动单元模型			不同渗流单元的变化
			裂缝模型	网络模型、密度模型		裂缝的空间展布
	连续型	参数模型	孔隙度模型、渗透率模型、饱和度模型			孔、渗、饱分布
层次规模与维数	维数与规模	一维(井)模型		单井地质模型、层内非均质模型		单井储层特征
		二维(层)模型		砂体剖面模型、平面模型		平面、剖面储层展布特征
		三维(体)模型		井组模型		三维空间储层分布特征
				砂体模型、参数模型、隔夹层模型		



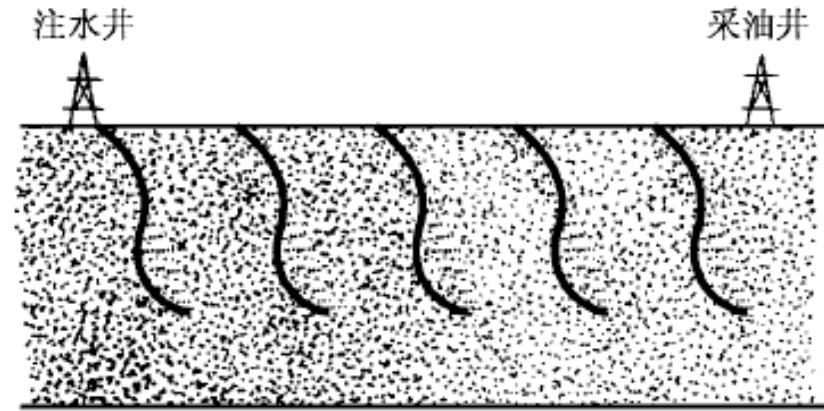
# 第一节 基本概念与模型类别



## (一) 依据不同开发阶段的任务与要求 (裘亦楠, 1991)

### 1、概念模型

是指把所描述油藏的各种地质特征,特别是**储层**,典型化、概念化,抽象成具有代表性的地质模型。只追求油藏(储层)总的地质特征和关键性地质特征的描述,基本符合实际,并不追求所有局部的客观描述。可供研究油田开发中的战略指导路线或开采机理。



点坝砂体的储层概念模型  
(据薛培华, 1991)

### 2、静态模型也称实体模型

►**定义**: 是把一个具体研究对象(一个油田、开发区块或一套层系)的储层,依据**资料控制点实测的数据**将其储层特征在三维空间的变化和分布如实地描述出来而建立的地质模型,并不追求控制点间的**预测精度**。建立这样的地质模型一般是**开发井网完成后进行**才有条件,为油田开发早期生产服务。





# 第一节 基本概念与模型类别



- **方法：**当前油藏描述的核心就是就是采用各种资料、用地质统计学的确定性建模方法来建立静态模型。20世纪60年代 — 80年代：储层静态模型建立的发展趋势为：从二维向三维方向发展。即从各种小层平面图、油层剖面图和栅状图，到带有网格参数的网格化三维储层模型。
- **作用：**为油田开发实施方案的执行，尤其是注采井别的确  
定、射孔方案实施提供技术支撑与资料基础。静态模型在我国注水开发实践中已得到广泛应用。



# 第一节 基本概念与模型类别



## 3、预测模型

- **定义：**预测模型不仅忠实于资料控制点的实测数据，而且追求控制点间的内插与外推值具有相当的精度，并遵循地质和统计规律，即对无资料点有一定的预测能力。
- **方法：**主要是采用**随机建模技术**，即将等概率的随机抽样方法（蒙特卡洛）与确定性的插值方法（克里金）相结合，所形成的地质统计学随机算法，来产生多个高精度的随机实现图像（预测模型）。从研究的技术思路与资料上讲，目前主要有两种：
  - 一是沉积学加地质统计学(用沉积微相图的分布特征与砂体的构形来建立定量地质知识库)；
  - 二是利用地震技术，尤其是井间地震技术。
- **当前储层表征的核心就是运用各种资料、采用定量的方法与随机建模技术建立储层的预测模型。**



# 第一节 基本概念与模型类别



## (二) 依据储层属性及模型表述的内容

### 1、骨架模型

主要是用于反映储层的**各向异性特征**，即储集体（砂体）性质与几何形态的空间展布。广义上储层骨架模型包括：沉积（相）模型、储集体（砂体）模型、流动单元模型及裂缝模型，其核心是它们均属于离散（变量）模型的范畴。

#### 1) 沉积模型

沉积模型主要是展现储层形成的沉积相，尤其是微相在三维空间的分布。油田开发生产实践表明，沉积相带的分布特征强烈地影响着地下流体的流动。同时，岩石物性的变化明显地受相类型的控制。严格来讲，所有的油气储层都是由多种沉积微相组成的，因此，**合理的相模型是精确建立参数模型（岩石物性模型）的必要前提。**



# 第一节 基本概念与模型类别



分类依据		分类结果		模型的作用与特征		
		大类	细分			
不同研究阶段与任务	离散型	骨架模型	沉积(相)模型	亚相模型、微相模型	结构模型 (储层非均质)	有效储集相带空间展布特征
			储集体(砂体)模型			
	连续型	流动单元模型			不同渗流单元的变化	
		裂缝模型	网络模型、密度模型		裂缝的空间展布	
层次规模与维数	维数与规模					



# 第一节 基本概念与模型类别



## 2) 储集体 (砂体) 模型:

尤其表现有效储集砂体与泥岩隔、夹层的三维空间分布特征。在必要的情况下也要建立隔、夹层连井剖面与模型，以此来**验证砂体模型与地质认识的一致性**。

**结构模型**: 是指储层内部不同类型储集体的大小、几何形态及其三维空间的展布，就碎屑岩而言，它是砂体连通性及砂体与渗流屏障空间组合分布的表征。

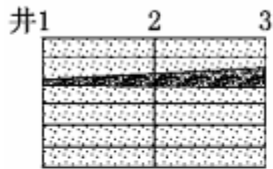
## 3) 流动单元模型:

流动单元模型是由许多流动单元块体镶嵌组合而成的模型，既反映了单元间岩石物性的差异和单元间边界，还突出地表现了同一流动单元内影响流体流动的物性参数的相似性。当储集 (砂) 体相对较为均质时 (即不存在明显的隔、夹层时)，砂体模型与流动单元模型十分近似，这时可将其作为流动单元模型。

## 4) 裂缝模型:

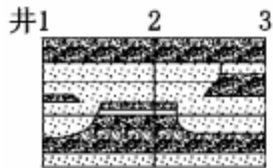
①为裂缝网络模型，主要是表征裂缝的类型、大小、形状、产状、切割关系及基质岩块特征等；②裂缝密度模型可以表征裂缝的发育程

## 对比之后模型基本范围



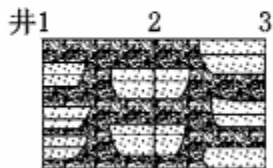
几乎完全确定的

在主要间断处划分, 在主要渗透率值处进一步划分, 使用多次地层测试器和脉冲测试



部分确定的

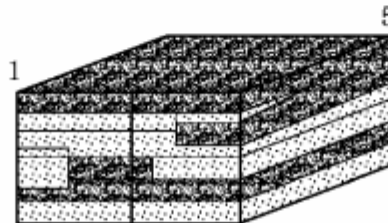
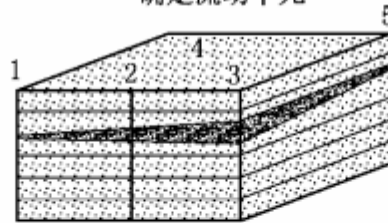
使用地质测井RFT数据、水平和垂直脉冲测试, 用倾角测井分析对砂体定位



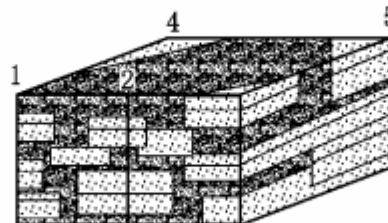
几乎未确定的

用倾角测井分析对砂体定位, 用地质数据库进行条件概率模拟

## 确定流动单元



与测试结果一致的、简化的完全确定模型



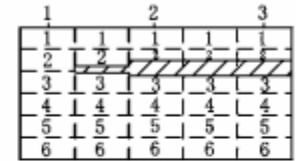
完成系列

据模拟机理、数据密度和成本考虑网格大小, 保存主要结构, 小层不能单个模拟, 据低渗透带和渗透率主要变化位置确定千层饼状储层的垂向网格

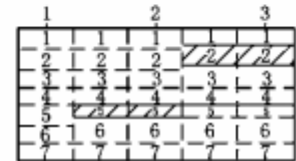
必要时尽可能地用非流体边界和空网格把拼合状储层转化成千层饼状模型, 网格体积变化应达到最小值, 因此薄层要加成厚层, 除非它们渗透性非常好

仍很困难, 常太详细, 以至于不能用单个砂体轮廓和内部特征进行完全模拟

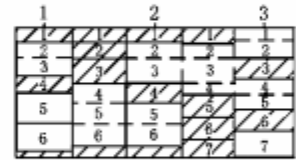
## 准备模拟模型



千层饼状储层的实际划分



拼合状储层的实际划分



拼块状储层的实际划分

--- 渗透边界  
—— 非渗透边界

概率模型近似法  
▨ 空块网格块层

确定性建模中用于储层模拟的结构模型分类  
(据K. J. Weber和L C. Van. Geuns, 1990)



# 第一节 基本概念与模型类别

## 2、参数模型

分类依据

不同研究阶段与任务

**参数模型：**属于连续变量分布模型的范畴。包括孔隙度、渗透率及含油（或含水）饱和度模型。这三种参数模型对于油藏评价及油气田开发均具有很重要的意义。尤其是渗透率的分布（因渗透率是表征渗流过程的最重要参数）。

表述内容与属性	离散型	分类结果		模型的作用与特征
		大类	细分	
层次规模与维数	连续型	参数模型	孔隙度模型、渗透率模型、饱和度模型	反映储集体内部物理特性的空间展布（非均质性）孔、渗、饱和度分布
	维数与规模			



# 第一节 基本概念与模型类别



## (三) 依据研究储层的层次规模与维数

### 1、按储层的层次与规模划分

划分模型的思路主要是依据储层非均质性层次而进行的，熊琦华、王志章等（1990）依据中国陆相油田的地质特点，主要是借用国外（Pettijohn, 1973）划分储层非均质的思路与方法，将储层地质模型划分为油藏规模、砂组规模、小层规模、单砂体规模、岩心规模及孔隙规模六个级别。

### 2、按研究的资料状况与维数

可划分为一维、二维及三维模型。

- 一维单井地质模型及一维层内非均质性模型；
- 二维砂体剖面、二维平面模型及二维层系剖面模型；
- 三维砂体骨架或参数模型，三维井组模型及三维夹层模型等。





# 第一节 基本概念与模型类别



## (四) 依据研究的数据对象或变量特征

### 1、离散型（性）模型（Discrete Model）

主要用于描述具有离散性质（各向异性）的地质特征，即储层某一性质的几何特性在空间上的不均一性分布，如沉积相分布、砂体位置和大小、泥质隔、夹层的分布和大小、裂缝和断层的分布、大小、方位等。

### 2、连续型（性）模型（Continuous Model）

主要用于描述储层连续参数（变量）（非均质性）的空间分布，即储层的物理特性在空间上的不均一性分布，如孔隙度、渗透率、流体饱和度、地震层速度、油水界面等参数的空间分布。

### 3、混合型（性）模型（Hybrid Model）

将离散参数与连续参数混合在一起来表述储层的综合空间分布特征。



## 第二节 储层建模的数理基础



### 一、模型方法原理

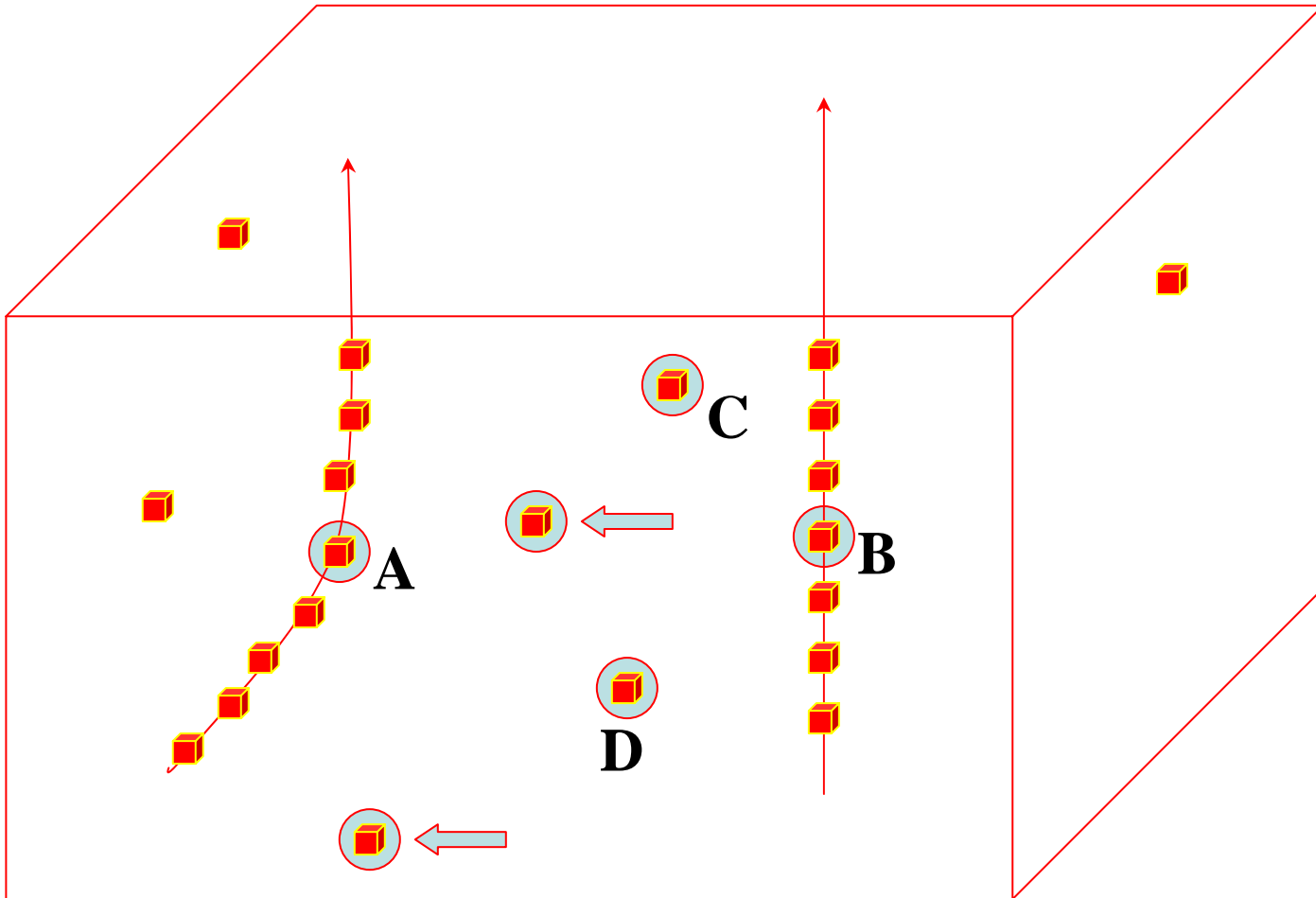
预测模型要解决的最一般问题是已知数据场的延拓。

#### (一) 一般性问题的提出

- 1、**已知**：特定的空间域以及其内有限个数据点。
- 2、**目标**：把握整个特定空间域的数据变化，即预测特定空间内任一点的数据值。
- 3、**基本约束条件**：
  - 空间内任一特定点的值并不仅只依赖于另一特定点，而是与整个数据场有关。
  - 对任一点进行预测所得的结果必须与全部已知数据场的整体结构相吻合，即预测得到的新值可以毫无矛盾地纳入原有的结构体系。
  - 预测过程能够体现待估参数在三维空间变化的各向异性特点。
  - 对任一求出的估计值或估计值场，必须有一个精度的衡量，即能够指出预测值的某一方面的可信度。



## 第二节 储层建模的数理基础





## 第二节 储层建模的数理基础



### (二) 解决模型问题的方法

- 解决模型问题的方法来自对已知条件的深入分析。例如一个河流沉积体系中的孔隙度预测或一个数值空间函数的变化特点。
  - 沿主河道方向，同一河道砂体上相邻两点的孔隙度相近，而在垂直河道方向上孔隙度就有较大的变化梯度，这种与空间相关的变化特点称为**数值空间函数的结构性**。
  - 其次，不管人们已经掌握了该体系中多少个孔隙度数据，其下一点的孔隙度值仍是不可知的，即特定空间域内任一点的值总具有**随机性**。
  - 这种结构性与随机性的双重性，决定了“不能用通常的数学分析方法对这种数值空间函数进行直接研究，而必须用随机函数来刻画”  
(N. Cressie, 1989)，即采用统计学方法。
- 储层研究所要解决的主要问题是储层的非均质性即各向异性问题。用数学语言描述各向异性即为某数值函数空间变化的不均一性。



## 第二节 储层建模的数理基础



➤ 所谓各向异性即指某数值函数空间变化的不均一性。对相距为  $h$  的两空间点  $P_1$ ,  $P_2$ , 其值的差为:

$$\Delta V = VP_1 - VP_2 = VP_x - VP_{(x+h)}$$

所谓各向异性应包括两种含义:

- 在不同方向上,  $\Delta V$  的变化不同。比如, 沿X方向上  $\Delta V_x$  和沿Y方向上的  $\Delta V_y$  在跨过相同的  $h$  距离时  $\Delta V$  的变化不同。
- 在同一方向上,  $h$  较小时和  $h$  较大时  $\Delta V$  值不同。



## 第二节 储层建模的数理基础



### 二、克里金法

#### (一) 概述

1951年D. G. Krige首次提出了一种局部估值方法，加权移动平均法。1960年马特隆提议用“克里金法”一词代替容易引起误解的加权移动平均法，自此“克里金法”一词广为引用，并成为地质统计学的基本方法。

#### (二) 区域化变量

区域化变量是特定空间上的一个数值函数，它在该空间的每一点取一个确定的数值。在储层研究领域，岩性、孔隙度、渗透率、砂层厚度等均可当作区域化变量。地质统计学理论认为，由于区域化变量的结构性与随机性的双重性质，必须采用随机函数的办法研究这种变量。

比如我们可以把随即函数 $Z(\mathbf{x})$ 当作确定在储层 $D$ 内每一点 $\mathbf{z}$ 的随机变量的集合：

$$Z(\bar{\mathbf{x}}) = \{Z(\bar{\mathbf{x}}_i), \forall \bar{\mathbf{x}}_i \in D\}$$

将储层内任一点  $\bar{\mathbf{x}}_i$  的孔隙度  $Z(\bar{\mathbf{x}}_i)$  解释为随机变量  $Z(\bar{\mathbf{x}})$  的一个特定的实现。



## 第二节 储层建模的数理基础



### (三) 变差函数

- 变差函数是区域化变量空间变异性的一种度量，反映了空间变异程度随距离而变化的特征。变差函数强调三维空间上的数据构形，从而可定量地描述区域化变量的空间相关性，它是克里金技术及随机模拟中的一个重要工具。

对于一维情况，设区域化变量 $Z(\vec{x})$ 定义在一维数轴上，则把 $Z(\vec{x})$ 在 $\vec{x}$ 、 $\vec{x} + \vec{h}$ 处的值之差之半定义为 $Z(\vec{x})$ 在轴方向上的一维变差函数，记为：

$$\gamma(\vec{x}, \vec{h}) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(\vec{x}) - Z(\vec{x} + \vec{h})] = \frac{1}{2} E[Z(\vec{x}) - Z(\vec{x} + \vec{h})]^2 - \frac{1}{2} \{E[Z(\vec{x})] - E[Z(\vec{x} + \vec{h})]\}^2$$

地质统计学将 $2\gamma(\vec{x}, \vec{h})$ 定义为变差函数， $\gamma(\vec{x}, \vec{h})$ 称为半变差函数或半变异函数 (Variogram)。

对于X轴上相隔为 $\vec{h}$ 的点 $\vec{x}_i$ 和 $\vec{x}_i + \vec{h}$  ( $i = 1, 2, \dots, N(\vec{h})$ )处的 $N(\vec{h})$ 用观测值 $Z(\vec{x}_i)$ 和 $Z(\vec{x}_i + \vec{h})$ , ( $i = 1, 2, \dots, N(\vec{h})$ )看成是 $Z(\vec{x}_i)$ 和 $Z(\vec{x}_i + \vec{h})$ 的 $N(\vec{h})$ 实现。则变差函数可用下式计算：

$$\gamma^*(\vec{h}) = \frac{1}{2N(\vec{h})} \sum_{i=1}^{N(\vec{h})} [Z(\vec{x}_i) - Z(\vec{x}_i + \vec{h})]^2$$

选择不同的 $\vec{h}$ ，即可计算出变差函数。对于给定的一个 $\vec{h}$ 值，可以求得一个 $\gamma^*(\vec{h})$ 以 $\vec{h}$ 值为横坐标，以值 $\gamma^*(\vec{h})$ 为纵坐标，做出一条关系曲线，就是变差函数图。



## 第二节 储层建模的数理基础

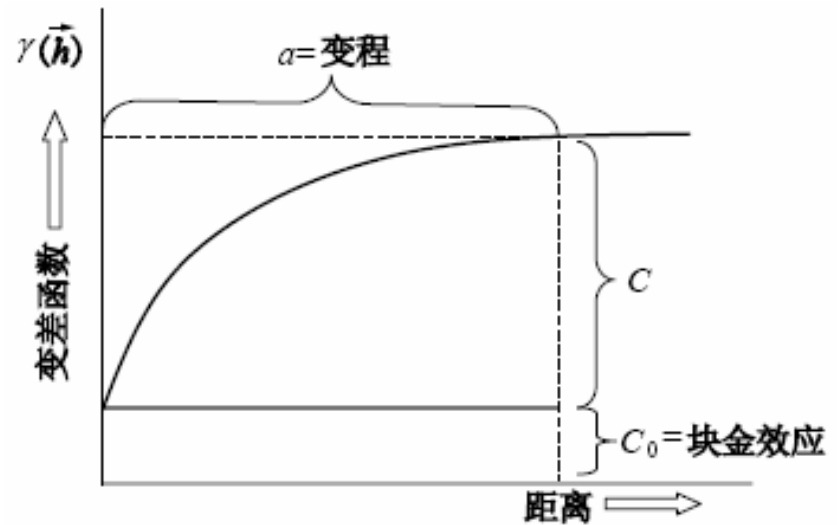


在以向量  $\vec{h}$  隔开的两点  $\vec{x}$  与  $\vec{x} + \vec{h}$  处的两个区域化变量值  $Z(\vec{x})$  与  $Z(\vec{x} + \vec{h})$  之间的变异可以用变异函数  $2\gamma(\vec{x}, \vec{h})$  来表征。当区域化变量满足二阶平稳假设时，变差函数为：

$$2\gamma(\vec{x}, \vec{h}) = E \left\{ [Z(\vec{x} + \vec{h}) - Z(\vec{x})]^2 \right\}$$

即变异函数是区域化变量增量的方差，它在一定条件下等于区域化变量增量平方的数学期望。

变差函数图中，地质参数的空间变化性及相关性可用变程  $a$  (Range)、块金常数 (值)  $C_0$ 、拱高  $C$ 、基台值 ( $Sill = C + C_0$ ) 等来表达。基台值：代表变量在空间上的总变异性大小，即为变差函数在  $h$  大于变程的值。当块金值 = 0 时，基台值 = 拱高，为样品方差。



试验半变异函数示意图



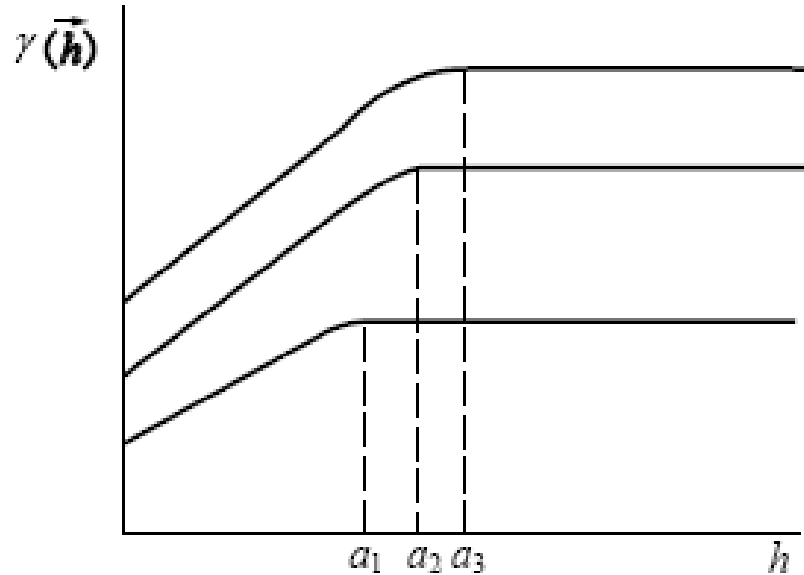


## 第二节 储层建模的数理基础



- ▶ 半变异函数能够有效地描述数据函数的变异（非均质）结构。
- ▶ 概率（随机）预测模拟方法能够保证预测结果符合已知的空间结构；更进一步，条件概率模拟（随机条件模拟）同时能够保证预测函数曲面通过已知数据点。
- ▶ 克里金法能够提供最小方差的线性无偏估值（确定性的插值方法），蒙特卡洛法是把握预测输出不确定性的最佳方法。

把上述三个方面的研究成果有机地融合起来，便构成了建立预测模型的基本方法体系，即随机建模的基本理论体系，或者说变差函数、克里金法及蒙特卡洛法是随机建模技术的三个最基本组成部分。



不同方向半变异结构的差异示意图

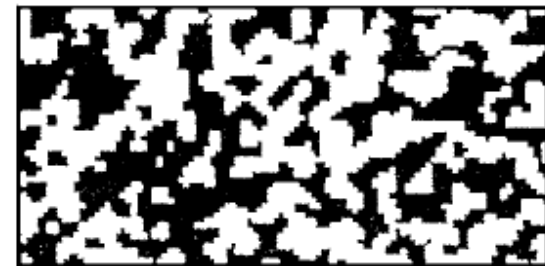
我们用各方向变程的比，表示各向异性的大小称为各向异性率，可表示为：

$$\left( \frac{a_1}{a_1}, \frac{a_2}{a_1}, \frac{a_3}{a_1} \right)$$

- **变程**: 指地质变量（区域化变量）在空间上具有相关性的范围。还能直接反映储层参数沿某一方向的变化速度的大小。
- **拱高**: 反映储层参数在某一方向变化的幅度。就是在取得有效数据的尺度上，可观测得到的变异性幅度大小。
- **块金常数**: 变差函数在原点间断，这在地质统计学中被称为“块金效应”，表现为在很短的距离内有较大的空间变异性。在数学上块金值  $C_0$  相当于变量纯随机性的部分。当  $h$  无论多么小时，两个随机变量都不相关，这种情况称为纯块金效应。



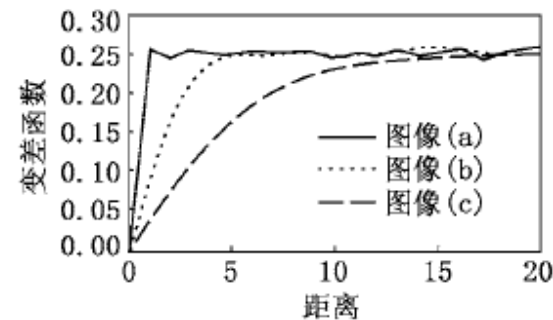
a



b



c



具不同变程的克里金插值图像

图中三幅图像的变程不同，则图像的空间相关性也不同，**a**变程最小，其空间相关性也最小，**c**变程最大，其空间相关性也最大。变程相对较大意味着该方向的观测数据在较大范围内相关，反之，则相关性较小。



## 第二节 储层建模的数理基础

### (四) 随机函数应用的假设条件

#### 1、二阶平稳假设

1) 数学期望存在且不依赖于支撑点:  $E\{Z(\bar{x})\} = m, \forall \bar{x}$

2) 对每一对随机函数  $\{Z(\bar{x}), Z(\bar{x} + \vec{h})\}$  有均方差, 且只依赖于二者间的相距矢量  $\vec{h}$ :  $C(\vec{h}) = E\{Z(\bar{x} + \vec{h}) \cdot Z(\bar{x})\} - m^2, \forall \vec{h}$

#### 2、内蕴假设

1) 有数学期望并且不依赖于支撑点  $\bar{x}$ 。

2) 对所有向量, 增量  $[Z(\bar{x} + \vec{h}) - Z(\bar{x})]$  均有一不依赖于  $\bar{x}$  的有限方差:

$$\text{Var}\{Z(\bar{x} + \vec{h}) - Z(\bar{x})\} = E\{[Z(\bar{x} + \vec{h}) - Z(\bar{x})]^2\} = 2\gamma(\vec{h}), \forall \vec{h}$$

亦即变异函数只依赖于分隔向量  $\vec{h}$ , 而与  $\bar{x}$  位置无关。

#### 3、拟平稳假设

当二阶平稳假设或内蕴假设只限于有限大小的距离,  $|\vec{h}| \leq b$  之内时就称之为拟平稳 (或拟内蕴) 假设, 其中  $b$  为估计邻区的直径或均匀带的范围。

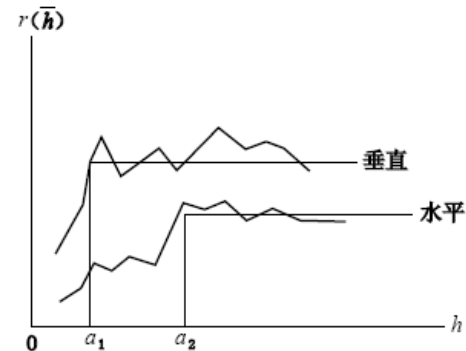
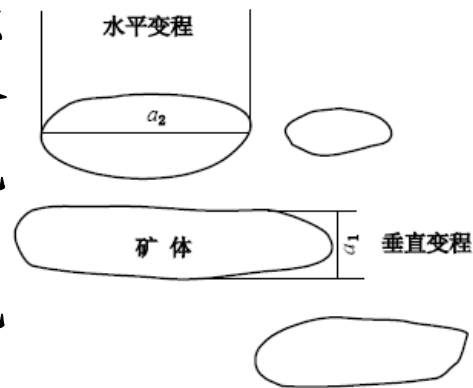
### (五) 变异结构分析及区域化的理论模型

➤ 由于区域化变量在不同方向具有不同的变化性，或者在同一方向包含着不同尺度上的多层次变化性，就无法用一个理论模型进行拟合，因此要全面地了解区域化变量的变化性，就必须进行结构分析。

➤ 结构分析就是构造一个变异函数模型，对全部有效结构信息作定量化的概括，以表征区域化变量的主要特征。

#### 1、异向性分析

求取每一个方向上的半变异函数并图示于统一的坐标系之中，即可确定是否存在异向性。



#### 变异函数所表示的结构异向性

垂直方向的半变异函数显示了一个短的变程 $a_1$ ，它反映的是矿体的厚度；而水平方向的半变异函数具有一个较长的变程 $a_2$ ，它对应的是矿体的水平宽度，这样变异函数方向图解就表示了矿体垂直与水平两个方向上形态的差异。



## 第二节 储层建模的数理基础



### 2、套合结构及块金效应

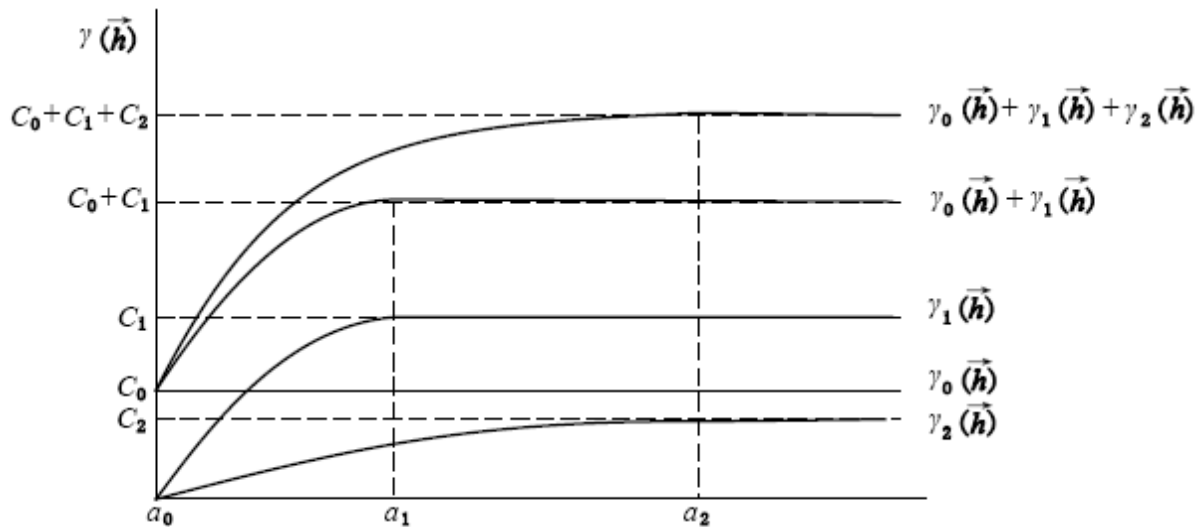
在目标区内，所有引起变异结构的原因在各种距离上同时发生作用称之为“套合结构”。

$$\gamma(\vec{h}) = \gamma_0(\vec{h}) + \gamma_1(\vec{h}) + \gamma_2(\vec{h}) + \dots + \gamma_n(\vec{h})$$

**几何各向异性：**各个方向的变差函数均具有相同的基台值 $C$ ，只是变程 $a_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) 不相同；其他的异向性称为**带状各向异性**；

**各向同性：**各个方向上的变差函数相同。

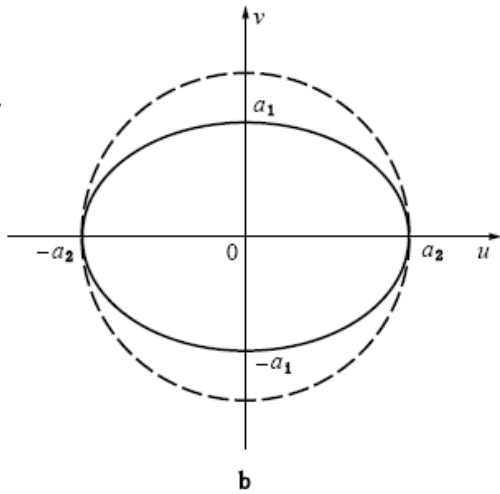
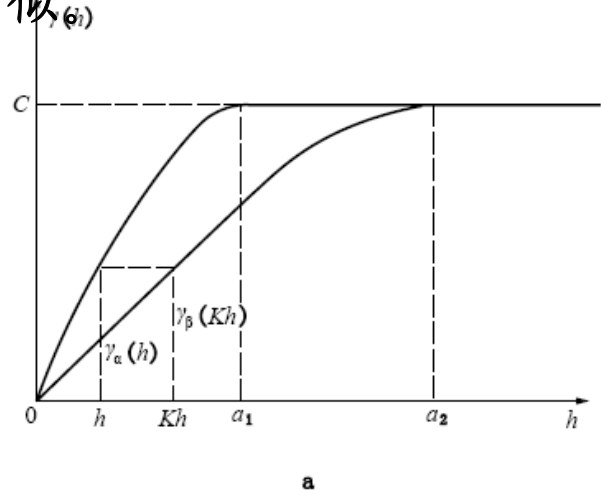
**变程图：**各个方向上的变程 $a$ 的图示。



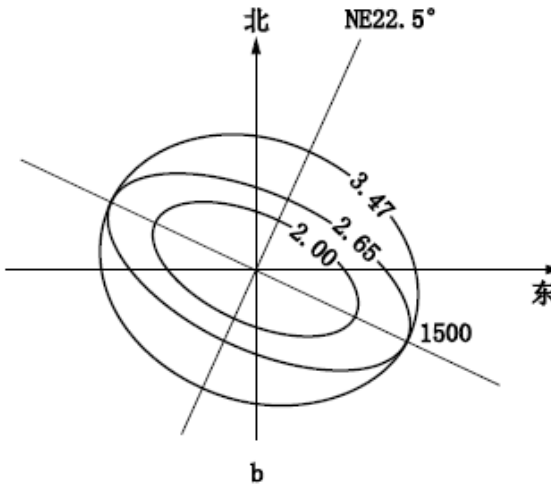
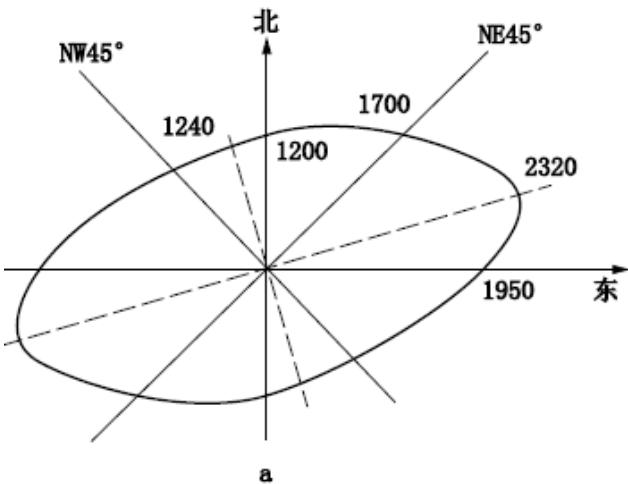
**套合结构与块金效应**  
(据於崇文, 1980, 修改)

这种表示方法可以方便地拟合具有不同基台的若干个实验变异函数。根据套合后的变差函数，可以解释不同层次的非均质性问题。

**各向同性:** 变程图近似于一个半径为 $r$ 的圆; **几何各向异性:** 变程图可以用椭圆来近似; **带状各向异性:** 变程图既不能用圆, 也不能用椭圆来近似



二维几何各向异性方向变程图  
(据孙洪泉, 1990)



大庆油田北区曲流河砂体与河口坝砂体的方向变程图 (据温道明和裘亦楠, 1992)

**a** 曲流河砂体, 具有几何各向异性; **b** 杏四区的河口坝砂体具有带状各向异性。



## 第二节 储层建模的数理基础



块金效应：变异函数在原点处出现不连续性。

纯块金效应：

$$\gamma_0(\vec{h}) = \begin{cases} 0 & \vec{h} = 0 \\ C_0 & \vec{h} > 0 \end{cases}$$

球状模型：

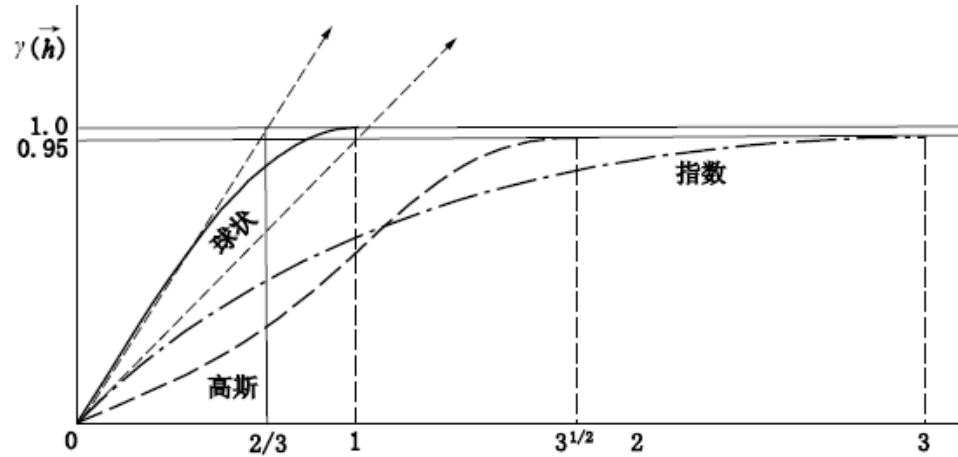
$$\gamma(\vec{h}) = \begin{cases} C_0 + C \left( \frac{3\vec{h}}{2a} - \frac{\vec{h}^3}{2a^3} \right) & \vec{h} \leq a \\ C_0 + C & \vec{h} > a \end{cases}$$

指数模型：

$$\gamma(\vec{h}) = C_0 + C \left( 1 - \exp\left(-\frac{\vec{h}}{a}\right) \right)$$

高斯模型：

$$\gamma(\vec{h}) = C_0 + C \left( 1 - \exp\left(-\frac{\vec{h}^2}{a^2}\right) \right)$$



有基台的模型（据於崇文，1980）

不同类型变差函数特征表

模型	通过原点的切线与基台值线交点的横坐标	变程	原点处的性状
球状	$2/3a$	$1a$	直线
指数	$a$	$3a$	直线
高斯	无交点	$3^{1/2}a$	抛物线



## 第二节 储层建模的数理基础



### (六) 克里金法的理论与实现

- 克里金法是一种局部估值方法，它能够以最小的方差（称为克里金方差）给出无偏线性估计量（称克里金估计量）。进行克里金估值所需要的基本信息是一个数据集和一种结构信息。
- 设 $Z(x)$ 为所研究的随机函数，它是二阶平稳的，试验数据是确定在点支撑之上的集合 $[Z_\alpha, \alpha=1,2,\dots,n]$ ，今用 $n$ 个数值的线性组合作为估计量。
- 要求估计的无偏性和最小估计方差。

$$Z_K^* = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha Z_\alpha$$

#### 1. 无偏条件

$$E\{Z_K - Z_K^*\} = 0$$

- 估计误差的数学期望为零,  $E\{Z_K - Z_K^*\} = E(Z_K) - E(Z_K^*) = E(Z_K) - E\left\{\sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha Z_\alpha\right\}$

而

$$E\{Z(x)\} = m$$

根据二阶平稳假设:

$$E\{Z_K - Z_K^*\} = m - m \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha = 0$$

其中 $m$ 是一个常数，由此可得:

$$\sum \lambda_\alpha = 1, \alpha = 1, \dots, n$$

即无偏条件为: 32





## 第二节 储层建模的数理基础



### 2、最小估计方差

$$\sum \lambda_{\alpha} = 1, \quad \alpha = 1, \dots, n \quad \frac{\partial E \{ [Z_K - Z_K^*]^2 \}}{\partial \lambda_{\alpha}} = 0 \quad \alpha = 1, \dots, n$$

联立线性方程组，得到 (n+1) 个方程组，即克里金组：

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - \mu = C(x_2, x) \quad \forall \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\beta} = 1 \end{cases}$$

或表示为半变异函数的形式：

$$\begin{cases} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \gamma(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = \gamma(x_{\alpha}, x) \quad \forall \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\beta} \lambda_{\beta} = 1 \end{cases}$$

其中  $\mu$  为拉格朗日参数。据此方程组即可解出 n 个权系数  $\lambda_{\beta}$ ， $\beta = 1, 2, \dots, n$ 。这样，克里金方差可表示为：

$$\sigma_K^2 = \sum \lambda_{\alpha} \gamma(x_{\alpha}, x) + \mu - \gamma(x_{\alpha}, x)$$

从中可以看出，在有实验数据存在的点上，克里金估计值恒等于实验值，制图学上称此性质为“**克里金面通过实验点**”。



## 第二节 储层建模的数理基础



### 三、蒙特卡洛法 (MonteCarlo)

#### (一) 简介

- 蒙特卡洛法亦称**统计模拟法**，起源于17世纪后半叶法国著名学者布丰的**随机投针试验**（1777年，用以估算圆周率）。但其实际应用和系统发展始于20世纪40年代。二战期间，著名物理学家冯·诺曼用**随机抽样方法**模拟了中子连锁反应（1946年），当时出于保密的需要将该方法以蒙特卡洛命名而沿用至今。
- 现代意义上的蒙特卡洛法是**应用随机数值技术进行模拟计算的方法的统称**，是一种应用领域非常广泛的统计学方法。其具体应用如下：
  - 1) 对给定问题建立简化的**概率统计模型**，使所求得解恰好是所建立模型的概率分布或数学期望；
  - 2) 研究生成伪随机数的方法及**由各种实际分布产生随机变量的抽样方法**；
  - 3) 根据统计模型的特点和实际计算的要求进一步**改善模型**，使之降低方差和提高计算效率；
  - 4) 给出获得求解问题的**统计估计值**以及方差或标准误差的方法。



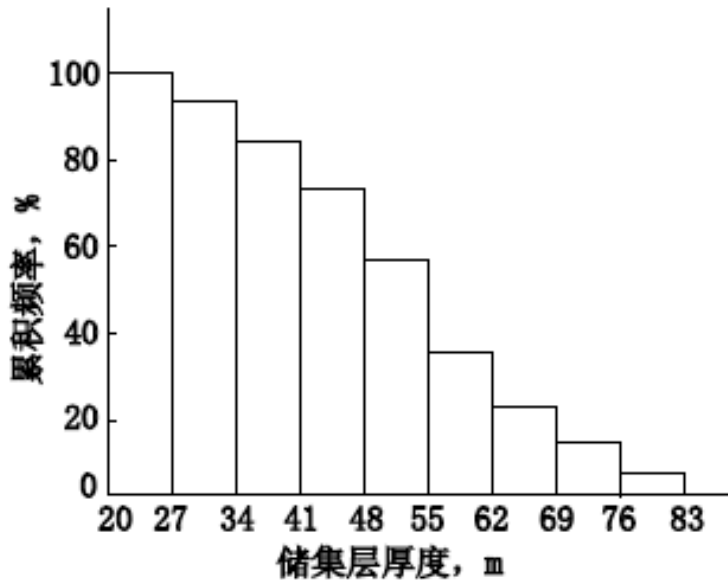
## 第二节 储层建模的数理基础



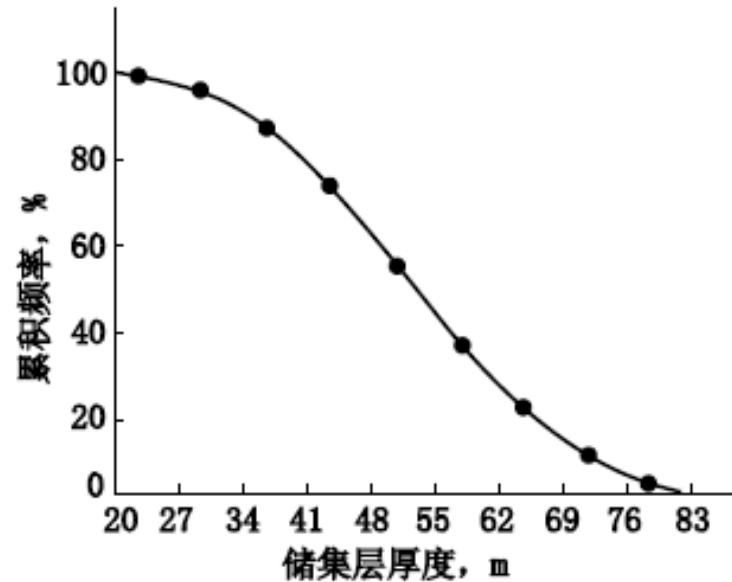
### (二) 方法原理及实现步骤

#### 1、构造随机变量的分布函数

1) 频率统计法: 当观测数据为大子样时, 可采用由观测数据构造直方图的方法求得所谓的经验分布函数, 只要观测数据的代表性较好, 经验分布函数也常常具有较好的代表性。



储层厚度的累积频率直方图



储层厚度的累积频率折线图



## 第二节 储层建模的数理基础



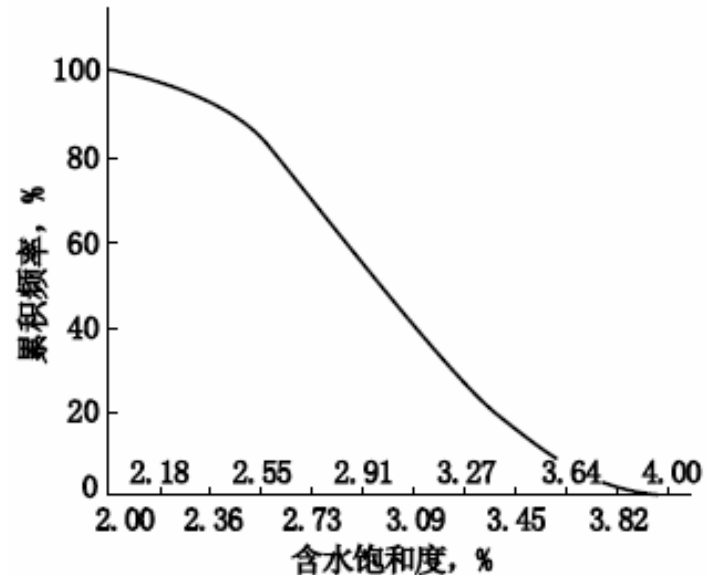
2) 理论分布概型公式法: 根据经验或一般规律, 已知某一原始随机变量的分布函数符合或接近某种分布的理论概型, 就可用该理论分布概型公式来构造随机变量的分布函数。

- 例如大量的实际资料表明储层的许多参数 (厚度、孔隙度等) 大都符合正态分布或对数正态分布, 就可以用现有实际资料, 求得均值和方差, 然后套入正态或对数正态分布公式即可求得分布函数。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \end{cases}$$

3) 简单分布函数: 如只有三个原始数据已知点, 则可用三角分布代替随机变量的分布函数。在边远地区或海洋石油资源评价中, 由于资料较少常采用这种方法。

$$AF(x) = \begin{cases} 1 - \frac{(x - x_1)^2}{(x_3 - x_1)(x_2 - x_1)} & (x \leq x_2) \\ \frac{(x_3 - x)^2}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} & (x > x_2) \end{cases}$$



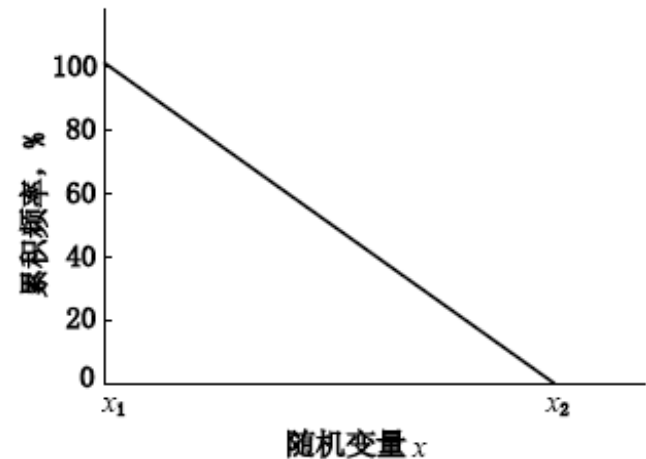


## 第二节 储层建模的数理基础



如原始数据只有两个点，则可用最简单的均匀分布代替随机变量的分布函数。

$$AF(x) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$$



### 2、产生伪随机数

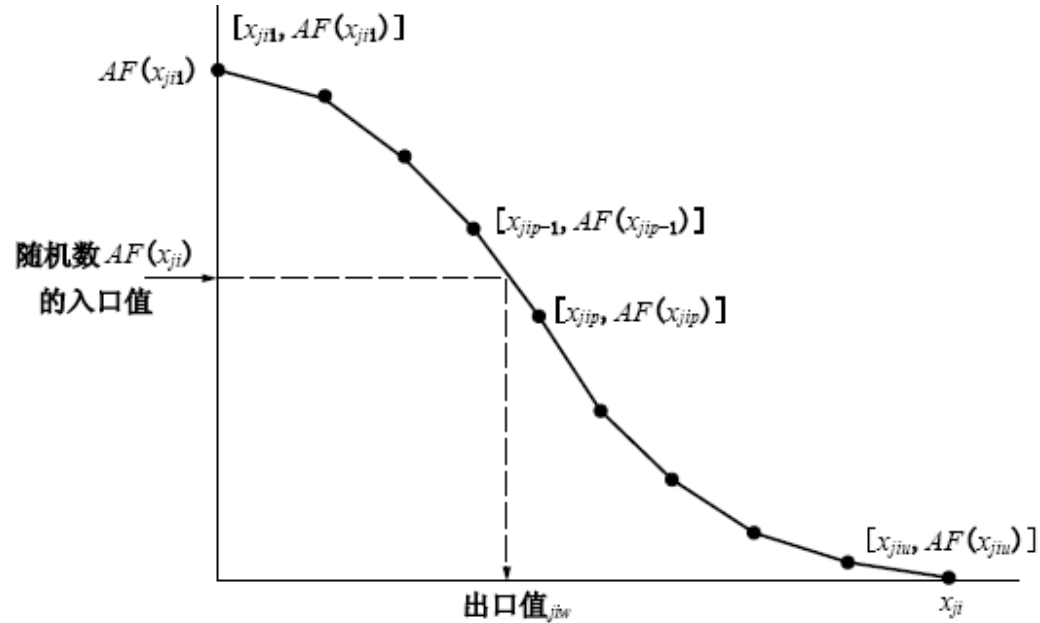
- 如何在计算机上经济快速的产生符合要求的随机数是蒙特卡洛法成功的基础。目前应用最广的是用**数学方法产生随机数**，严格地说用数学方法是不能产生真正随机数的，但经验表明用数学方法产生的随机数能够满足模拟的精度，故应用广泛并称之为“**伪随机数**”。
- 常用的数学方法有迭代取中法、移位法、同余法等。



## 第二节 储层建模的数理基础



### 3、抽样模拟



- 以 $[0,1]$ 区间上均匀分布的随机数序列中的第 $n$ 个随机数 $v_n$ 作为第 $i$ 个随机变量的 $x_{ji}$ 的分布函数 $AF(x_{ji})$ 的概率入口值，沿 $x_{ji}$ 轴方向作平行线与分布函数相交后，再沿 $AF(x_{ji})$ 轴方向作平行线直到与 $x_{ji}$ 轴相交，得到交点的值为 $x_{ji}$ ，称为出口值（实际应用中出口值是用线性插值法求出的）。这一出口值即为随机变量蒙特卡洛法模拟的第一个随机估值，根据具体问题的要求这种模拟可以进行许多次，并可进行必要的概率统计整理。



## 第三节 储层建模方法



- **储层建模的核心：**实现储层的（三维空间赋值）；
- **储层建模的本质：**井间储层预测。即在给定资料（或有限的现有资料）的前提下，对特定的储层特征进行三维空间预测。

### 一、概述

#### （一）分类

确定性建模和随机建模。

#### （二）前提条件

- **确定性建模：**认为资料点间的插值是唯一而确定的；
- **随机建模：**承认地质参数或属性的分布具有一定的随机性，对已知控制点间的内插不是唯一而确定的，即对已知控制点进行随机模拟。要求在建立储层地质建模时充分考虑这些随机性所引起的多种可能出现（等概率）的实现，以便供人们选择，做出风险决策。但每一个实现都应是现有资料条件下对实际资料的合理反映。



## 第三节 储层建模方法



### 二、确定性建模

#### (一) 地震信息的确定性转换

三维地震资料具有**覆盖面广、横向采集密度大的优点**，有利于研究储层属性的横向分布，并进行储层建模研究。然而，三维地震资料分辨率低，仅为砂组或油组规模，而且预测的储层参数（如孔隙度、流体饱和度）的精度较低。

➤ **应用地震资料进行储层建模的基本步骤如下：**

- 1) 层位标定、追踪及断层解释，建立断层模型及层面模型；
- 2) 分层提取或通过反演得到以建模层为单元的地震属性（如速度、振幅、频率、波阻抗等）数据体；
- 3) 应用岩心与测井解释的储层岩性、储层参数与井旁道不同地震属性进行相关分析，建立地震属性与地质参数的相关关系（确定性井—震关系）。
- 4) 针对三维地震属性数据体，根据井—震关系，将地震属性转换为地质参数，从而形成三维地质参数数据体。





## 第三节 储层建模方法



### (二) 井间砂体/小层对比

- **定义:** 在油田开发阶段, 应用开发井网资料, 通过在三维视窗下进行井间开发小层、沉积相或砂体对比, 建立三维储层骨架模型。
- **最重要基础:** 高分辨率的等时地层对比及沉积模式的指导。
- **高分辨率等时地层对比**
  - **作用:** 为小层或砂体的对比提供等时地层格架,
  - **关键:** 应用层序地层学原理, 识别并对比反映基准面高频变化的关键面 (如层序界面、洪泛面、冲刷面等) 或高频基准面转换旋回。
  - **主要方法:** 岩心对比分析、自然伽玛 (或自然伽玛能谱) 测井对比分析、高分辨率地震资料的测井约束反演分析、井间地震资料分析、高分辨率磁性地层学分析、岩石和流体性质分析、油藏压力分析等。

**砂体对比的准确程度取决于井距大小和储层结构的复杂程度。**

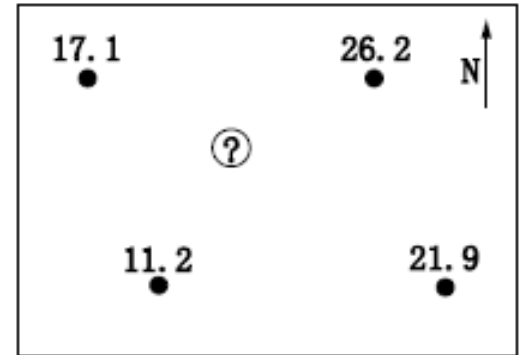


## 第三节 储层建模方法

### (三) 井间插值方法

- **定义:** 在三维网格化的基础上, 根据井资料 (包括地震资料), 应用插值方法对每个网格赋以储层参数值 (孔隙度、渗透率或含油饱和度)。是建立确定性储层模型的常用方法。
- **核心:** 是根据待估点周围的若干已知信息及其对待估点的贡献大小 (即加权值), 对估点的未知值作出加权估计。

$$Z(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(X_i)$$



井间预测问题

- **分类:** 数理统计学插值方法和地质统计学插值方法。

**地质统计学的核心: 克里金方法。** 在计算权系数时, 不仅考虑观测点与待估点之间的距离, 而且考虑地质规律所造成的储层参数在空间上的相关性, 对估点 (估计方差最小) 做出最优、无偏 (估计值的均值与观测值的均值相同) 的估计。



## 第三节 储层建模方法

- 在进行克里金估计时，仅考虑变程范围内的观测值，而变程之外的观测值不为估计提供信息，即和待估点是不相关的。变程越大，变量的空间相关性越大。
- 在求取变差函数后，即可通过求解克里金方程组求取权系数。下式为普通克里金方程组。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \gamma(x_i - x_j) \lambda_i - \mu = \gamma(x_0 - x_j) (j = 1, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases}$$

式中：  $(x_i - x_j)$  — 任意两个观测点  $(i, j)$  之间的变差函数；

$(x_0 - x_j)$  — 待估点与第  $i$  个观测点之间的变差函数；

$\mu$  — 拉格朗日常数；

$\lambda_i$  — 第  $i$  个观测点对待估点的权系数。

- 克里金方法所给出的井间插值虽然是确定的值，但并非真实的值，仅是接近于真实的值，其误差大小取决于方法本身的适用性及客观地质条件。



## 第三节 储层建模方法



### 三、随机建模

#### (一) 相关概念及意义

- 地下储层本身是确定的，它是许多复杂地质过程（构造作用、沉积作用及成岩作用）的综合结果，具有确定的性质和特征。但是由于认识程度的不足，储层描述便具有不确定性。这些需要通过“猜测”而确定的储层性质，即为储层的**随机性质**。
- 导致不确定性的主要因素包括：
  - 资料拥有量的限制；
  - 资料置信度的差异——测量误差；
  - 人们对各种地质资料和地质客观规律认识上的局限性。
  - 输入数据粗化方法的选择，比如对同样的测井数据，当选择不同的平均化方法时，采样后的块数据可能存在较大的差异，这里所说的“块”是地质网格。

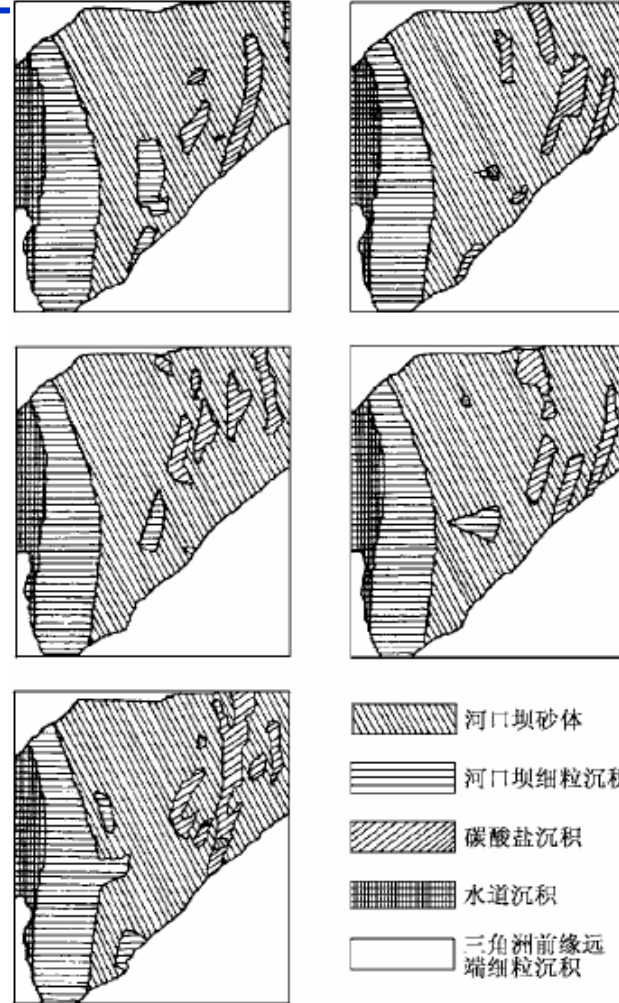
## 第三节 储层建模方法

### 1、定义

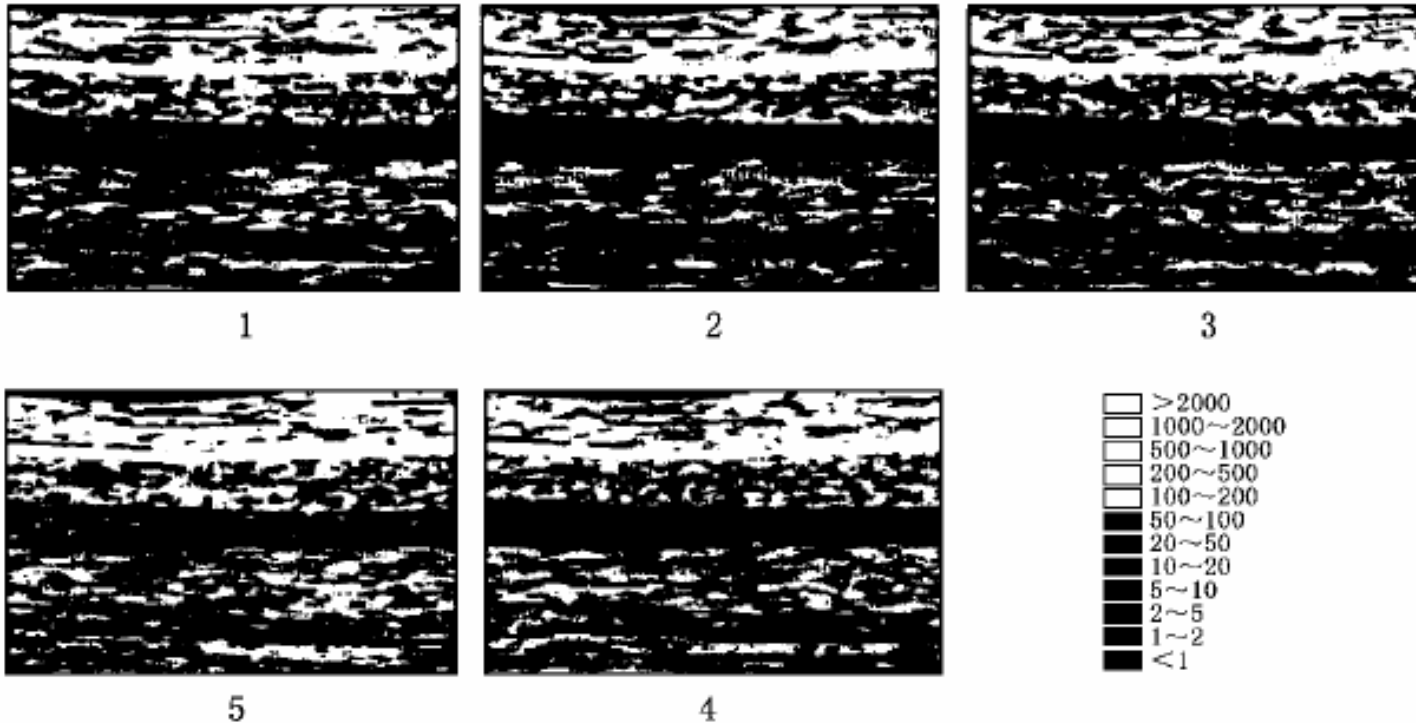
随机建模就是以现有的数据或信息为基础，以随机函数为理论，通过计算机技术人工合成**可选的、等概率的、高精度的**反映现有参数数据空间分布的模型。

#### ➤ 可选性

是指所合成（建立）的模型是多个而不是一个，每个模型都是在现有数据条件下，对储层参数的合理反映；这就可满足油田开发决策在一定风险范围的正确性。



离散模型的不同实现，示三维沉积相模型的水平切片（据E. Dasmlesh等，1992）



连续模型的不同实现，示三维渗透率模型的垂直切片（据E.Dasmslesh等，1992）



## 第三节 储层建模方法

### 2、双重性

- 一方面，该技术的重点是研究属性场中属性的空间相关性；也就是要产生与已知数据属性的空间相关性相同的属性场。
- 另一方面，应用该技术建立储层模型可以得到某一属性场的多个符合地质统计数据结构的等概率实现；用以说明实际属性场在空间组合上的不确定性，通过比较各模拟实现的差异来评价储层分布的不确定性，从而为决策者进行勘探与开发风险分析提供科学依据，这也是随机建模的最大优点。

### 3、目的

- 从广义上讲是建立储层的预测模型，以实现控制点间内插和外推，即井间或外延井的储集体（各向异性）和/或储层物理属性（非均质性）的预测。
- 从狭义上讲包括：①产生多个符合地质统计数据结构的模型；②模拟精细规模的非均质性；③评估不确定性并提供多种实现。



## 第三节 储层建模方法

### 4、与确定性克里金方法的比较

- 确定性克里金方法不能满足随机建模的目的。
- 确定性克里金方法是一种光滑的内插方法，给出的是局部唯一的精确估计；
- 而随机模拟重点放在恢复区域特征（结构）和统计参数（直方图、协方差等）上，而不是拘泥于局部的精确性。给出的是多个等概率的实现，这一系列实现的差异反映了储层属性空间分布的非均质性和不确定性。

### (二) 随机模拟方法

#### 1、基于目标的模拟

其基本模拟单元为目标物体（即是离散性质的地质特征，如沉积相、流动单元等），主要方法有示性点过程。





## 第三节 储层建模方法



### 确定目标点位置的规则:

- 密度函数（即各属性的体积比例及其分布趋势）；
- 关联（如井间相连通）和排斥原则（如相同物体或不同物体之间不接触的最小距离）。

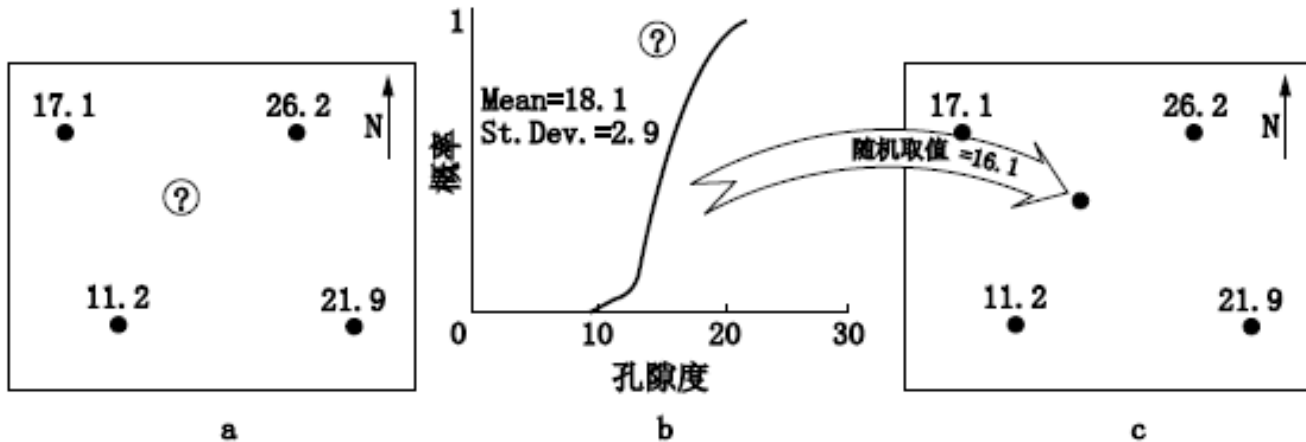
### 2、基于象元的模拟

其基本模拟单元为象元（相当于网格化储层格架中的单个网格），既可用于连续性储层参数的模拟，亦可用于离散地质体的模拟。这类方法主要包括序贯高斯模拟、截断高斯模拟、序贯指示模拟、分形模拟、多点地质统计等。

#### 1) 序贯高斯模拟 (Sequential Gaussian Simulation)

- **定义：**高斯随机域是最经典的随机函数，该模型的最大特征是要求随机变量符合高斯分布（正态分布）。实际应用中经常与序贯原理结合，即为序贯高斯模拟，是在连续型随机变量的模拟中最常用的一种方法。

- **序贯高斯模拟过程**：是从一个象元到另一个象元序贯进行的，用于计算某象元条件概率分布函数的条件数据除原始数据外，还考虑已模拟的有所数据。
- 针对一个具体待模拟的网格，首先求取该网格的累积条件概率分布函数（ccdf），然后随机提取一个随机数（0-1），该随机数对应的分数即为该网格的模拟值，这一过程遍历所有待模拟的网格，便可建立一个模型（即随机模拟的一个实现）。



基于象元的随机建模示意图（据Sribastava, 1994, 修改）

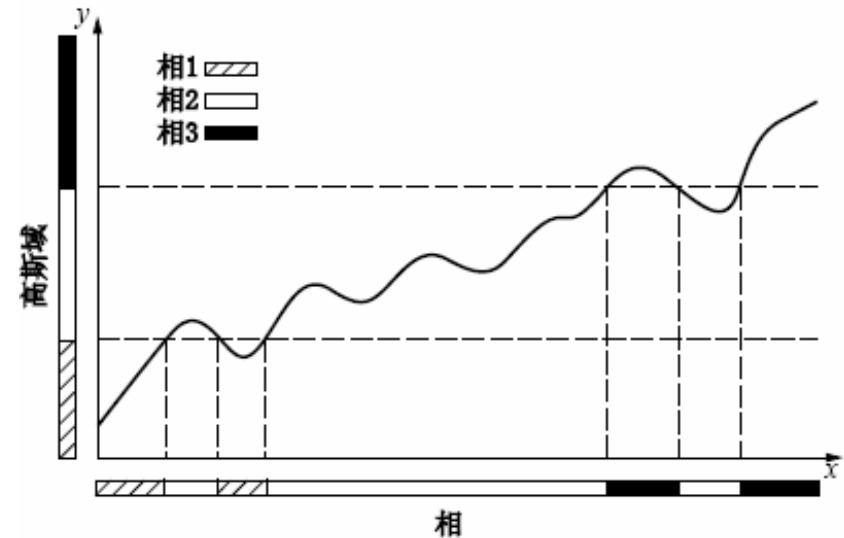
a-条件数据及待模拟位置； b-AT； c-模拟值

## 第三节 储层建模方法

### 2) 截断高斯模拟 (Truncated Gaussian Simulation)

- **定义:** 用于离散型随机模型。通过一系列门槛值, 截断高斯域中的三维连续变量, 从而建立离散物体三维分布的随机建模方法。
- **两个关键步骤:** 首先对指标 (指示) 变量进行正态转换建立三维连续变量的分布, 然后通过门槛值及门槛规则对连续变量分布进行截断, 从而获得离散物体的模拟实现。门槛值通过实际资料的统计而获得, 可根据地质规律限定门槛趋势。
- **适用范围:** 相带呈排序分布的沉积相模拟, 如三角洲 (平原、前缘和前三三角洲)、呈同心分布的湖泊 (滨湖、浅湖、深湖)、滨面 (上滨、中滨、下滨) 的随机模拟。

右图中, 相1、2、3依次分布。  
相1、2接触, 相2、3接触, 而  
相1不可能与相3直接接触。



截断高斯模拟中连续高斯域的截断



## 第三节 储层建模方法

### 3) 序贯指示模拟 (Sequential Indicator Simulation)

- **定义:** 将序贯模拟原理与指示克里金结合。指示模拟既可用于离散的类型变量 (如沉积相、岩性), 又可用于离散化的连续变量类别的随机模拟, 主要用于类型变量的指示模拟。
- **指示模拟的最大特点是指示变换。** 对于模拟目标区内的每一类相, 当它出现于某一位置时, 指示变量为1, 否则为0。原始数据可直接进行指示变换, 而待模拟的指示变量的性质和位置是通过待模拟相的平均频率 (即指示变差函数) 给定的。
- **基本模拟思路与序贯高斯模拟相似,** 只是ccdf的求取方法不同。在模拟过程中, 对于三维空间的每一网格 (象元), 首先通过指示克里金估计各类型变量 (设为K个) 的条件概率, 接着确定K个类型的任意次序 (如1, 2, ..., K), 并归一化使所有类型变量的条件概率之和为1, 从而确定该象元的条件分布概率函数; 然后, 在条件概率分布函数中随机提取一随机数 (0或1), 该随机数所落在的区间则决定了该象元的模拟类型。这一过程在其他各个象元进行运行, 便可得到研究区内的类型变量分布的随机图像。模拟过程是从一个象元到另一个象元序贯进行的, 而且在计算某象元条件概率分布函数时, 除使用原始数据外, 还考虑已模拟的所有数据。



## 第三节 储层建模方法

### 4) 分形模拟 (Fractal Simulation)

- 最大特征是变量具有自相似性，即局部与整体相似 (Mandelbort)。在分形模拟中，主要应用统计自相似性，即任何规模上变量的变化与任何其他规模上变量的变化相似，亦即任一规模上变量的方差与其他规模上变量的方差成正比，其比率取决于分形维数 (或间断指数)。
- 分形模拟一般采用误差模拟算法，其模拟实现为克里金估值加上“随机噪音”。

### 5) 多点地质统计 (Multiple-Point Geostatistics)

- 多点地质统计学是相对基于变差函数的传统地质学而言的，由美国斯坦福大学A. G. Journel等人提出来。在多点地质统计学中应用“**训练图像**”代替变差函数表达地质变量的空间结构性，因而可以克服传统地质统计学不能再现目标几何形态的不足，同时，该方法**仍然以象元为模拟单元，而且采用序贯法，因而很易忠实条件数据。**



# 常见的随机模拟方法比较

随机模拟方法		变量类型	适用条件	统计要求	优点	不足
分类	名称					
基于目标的模拟方法	示性点过程 (布尔模拟)	离散	目标体形态及配置关系简单	给定目标体形态、规模及配置关系	能很好地表达相形态	难于完全条件化
基于象元的模拟方法	序贯高斯模拟	连续	空间变异性小; 一般要求相控	计算变差函数	条件化容易	不能保证变量分布的连续性
	截断高斯模拟	离散	排序相分布	计算变差函数	能很好恢复排序关系	相边界连续性较差
	序贯指示模拟	离散 / 连续	任意相分布; 变异性大的参数如渗透率	计算各离散 (化) 变量的指示变差函数	条件化容易, 整合多信息	不能很好地恢复相形态及配置关系
	分形模拟	连续 / 裂缝	符合分形特征	计算分维数	能模拟裂缝分布	整合多信息难, 条件化难
	多点地质统计模拟	离散	任意相分布	给定训练图像	条件化容易, 能较好地表达简单相分布	难于表达复杂、非平稳相分布



## 第三节 储层建模方法

China University of Geosciences  
Bill Yu  
Beijing

### (三) 随机建模的关键环节

- 随机建模的基本环节与确定性建模相似，均包括**数据准备**、**构造建模**、**储层建模**、**图形显示**等基本环节，同时均可进行三维体积计算，在进入数模器之前均应进行模型粗化，但是，两者仍有所差别，关键差别是在随机建模中需要选择随机模拟方法、确定统计特征参数、验证优选模拟实现等。

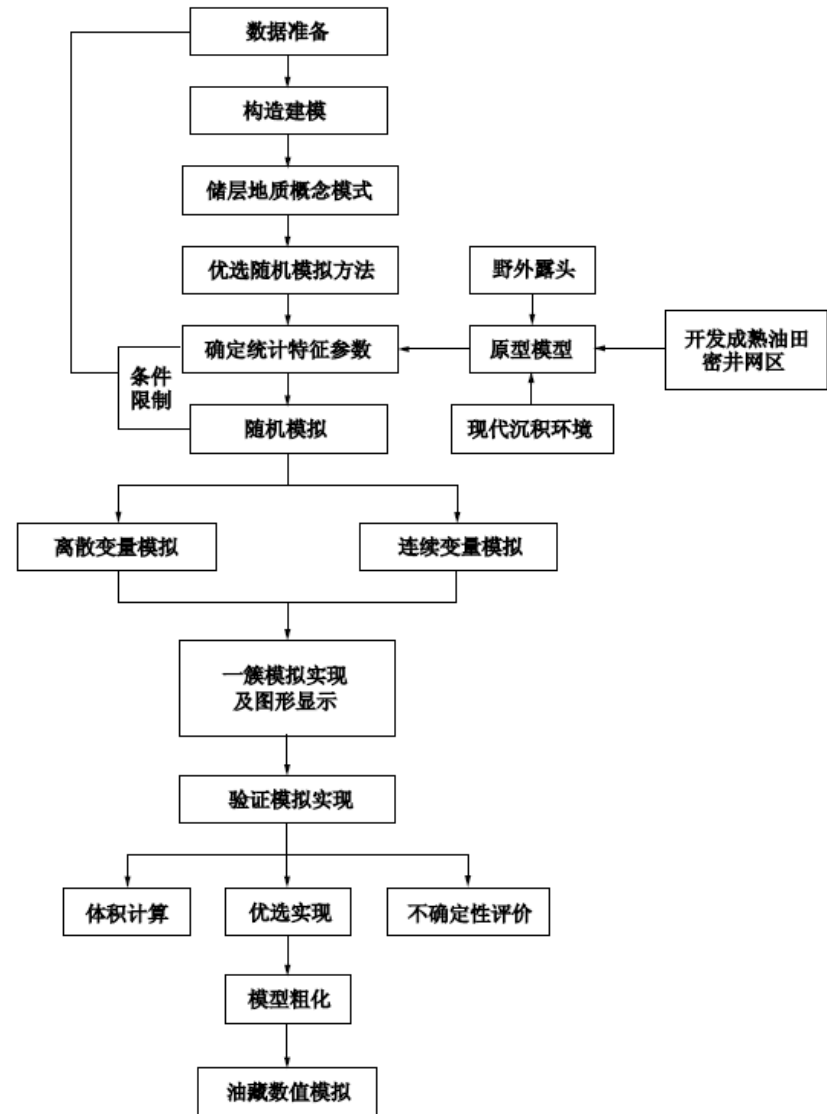


图 9-28 随机建模流程 (据吴胜和, 1998)



## 第三节 储层建模方法



### 1、选择随机模拟方法

➤ 不同的随机模型有其地质适用性及应用范畴：

- **示性点过程**：预知相的几何构型（几何形态和组合方式）；
- **截断高斯模拟方法**：具有排序分布的相组合最为合适；
- **序贯指示模拟**：应用于既不知几何构型，相组合又无排序现象。
- **指示模拟方法**：很适合控制参数模拟中极值分布的连续性。

➤ 为了产生能够反映不同特征的数值模型，在储层建模中，应考虑采用**混合方法（多种方法）**。例如，首先利用示性点过程或其他离散模型得到不同岩相的分布，接着针对不同岩相应用连续模型如高斯方法模拟连续的岩石物性的分布，然后应用模拟退火的方法局部校正岩石物性，以便与试井数据相吻合。如果储层内存在裂缝，还可应用分形方法或示性点过程对裂缝分布进行模拟。





## 第三节 储层建模方法



### 2、确定统计特征参数

- 对于不同的随机模拟方法，模拟输入的统计特征参数有所不同。
  - **示性点过程**：主要为砂体（或相）的形态特征（如形状、长宽比、宽厚比）、产状特征、砂泥比等；
  - **高斯域**：变差函数和概率密度函数特征值等；
  - **指示模拟**：主要为指示变差函数和概率密度函数特征值；
  - **分形模拟**：主要为分形维数（或间断指数）和不同规模的方差。
- 所谓**原型模型**是指与模拟目标区储层特征相似的露头、开发成熟油田的密井网区或现代沉积环境的精细储层模型。

应用原型模型，不仅可以为模拟目标区提供模拟需要的地质统计特征参数，而且可以推导或优选适用于某类成因类型储层的地质统计学方法。



## 第三节 储层建模方法



### 3、验证和优选随机模拟实现

验证和优选随机模拟实现的标准:

- 随机图像是否符合地质概念模型
- 随机实现的统计参数与输入参数的接近程度;
- 模拟实现是否忠实于真实的数据, 主要判别它与未参与模拟的硬数据是否吻合, 如抽稀的井数据、试井反映的砂体连通性数据等;
- 模拟实现是否符合生产动态, 可通过简单的二维油藏数值模拟或局部的三维数模的“历史拟合”情况进行判别。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 一、储层建模的基本程序

(一) 建立井模型 (点)

(二) 建立层模型 (线到面)

(三) 建立体 (参数) 模型 (体)



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 一、储层建模的基本程序

#### (一) 井模型

1. 把井筒中得到的各种信息转换为地质特征参数，建立每口井显示各种地质特征的一维柱状剖面。

2. 井筒一维剖面中最基本的九个参数是：

渗透（砂岩）层，有效层，隔层；含油层，含气层，含水层；孔隙度，渗透率，饱和度。

3. **关键点：**是建立把各种储层信息转换成储层地质特征参数的解释模型。

现阶段测井是普遍获得储层信息的主要手段。

#### (二) 层模型

层模型包含两个含义，其一为**构造模型**，其二为**基于层的储层特征分布模型**。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 1、构造模型

1) 把每口井中的每个地层单元通过井间等时对比连接起来，建成储集体的空间格架，即构造模型。

2) 沉积层总是由大到小可以逐级划分为大沉积旋回→小沉积旋回→单层→层内韵律段。层序地层学可划分出多级层，层序→准层序组→准层序→层组→层→层系→纹层。高分辨层序地层学可划分出：长期基准面旋回→中期旋回→短期旋回。

3) 关键点是正确地进行小单元的等时对比，尤其是井间小层或砂体的对比。对比单元愈小，建立的储集体格架愈细。

4) 井间小层对比的一般原则是：**界面划分、分级控制、相序指导、等时对比。**



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 2、平面层储层模型

- 为基于平面层的储层特征分布模型，包括平面相分布模型、砂体厚度分布模型、孔隙度分布模型、渗透率分布模型等。在这类模型中，垂向上为1个网格（网格厚度为层厚度），平面上按X、Y方向划分若干网格（网格大小与三维建模中的平面网格大小相同或更小）。对于每一个网格，均有一个数字化的储层特征值，如相代码、孔隙度、渗透率。这类模型的主要目的是在三维储层建模中约束三维网格赋值。
- 平面层储层模型的建立途径有两种：
  - 其一，先编制矢量图（对于离散变量，如沉积相）或等值线图（对于连续变量，如渗透率），然后转化为数字化网格模型；
  - 其二，直接基于平面网格，建立沉积相、储层参数分布模型。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



- **定义：**在构造模型基础上，根据井模型，在平面层储层模型的约束下，定量地给出储集体内空间各点的各种**储层属性值**。
- **储层的三维网格化**
  - **关键点：**根据已知井点（控制点）的参数值内插（外推）井间未钻井区域储层的各种属性值；内插误差愈小，地质模型精度就愈高，但精度与网格细度是相互制约的。
  - **基本步骤：**先建立相模型，然后在相的控制下建立储层参数模型。
  - **储层参数建模的难点**是渗透率建模，其原因是渗透率空间变化大、非均质程度最高、预测难度最大。一般的方法是先建立孔隙度模型，然后利用岩心分析测得的孔隙度与渗透率，建立两者相关关系，再由孔隙度模型转换成渗透率模型。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 二、具体建模步骤

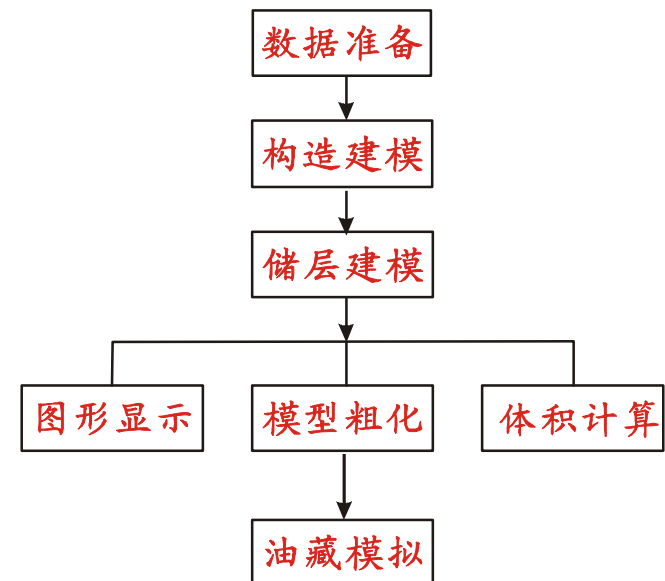
#### ➤ 具体步骤:

- 1、建立各井点的一维垂向模型;
- 2、建立储层的框架 (由一系列叠置的二维层面模型构成);
- 3、在储层框架基础上, 建立储层各种属性的三维分布模型。

#### ➤ 广义的三维储层 (油藏) 建模过程一般包括四个主要环节:

1、数据准备; 2、构造建模; 3、储层属性建模; 4、图形显示。

#### ➤ 根据三维地质模型, 可进行各种**体积计算**。如果要**将储层模型用于油藏数值模拟**, 则应对其**进行网格的粗化**。



储层建模流程图





## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### (一) 数据准备

#### 1、数据类型

- 从数据来源来看：岩心、测井、地震、试井、开发动态等方面的数据；
- 从建模内容看：
  - 坐标数据：包括井位坐标、地震测网坐标等。
  - 分层数据：各井的油组、砂组、小层、砂体的划分对比数据；地震资料解释的层面数据等。
  - 断层数据：断层位置、断点、断距等。
  - 储层数据：是储层建模中最重要的数据。包括单井储层数据、地震储层数据及试井储层数据。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



- **单井储层数据**: 岩心和测井解释数据, 包括单井沉积(微)相、砂体、隔夹层、孔隙度、渗透率、含油饱和度等数据(即井模型), 这是储层建模的硬数据, 即最可靠的数据;
- **地震储层数据**: 主要为速度、波阻抗、频率等, 为储层建模的软数据, 即可靠程度相对较低的数据。
- **试井(包括地层测试)储层数据**: 其一为储层连通性信息(硬数据); 其二为储层参数数据(软数据), 为井筒周围一定范围内的渗透率平均值, 精度相对较低。

### 2、数据集成及质量检查

- 集成各种不同比例尺、不同来源的数据, 形成统一的储层建模数据库, 以便于综合利用各种资料对储层进行一体化分析和建模。
- 为了提高储层建模精度, 必须对各类数据进行全面的质量检查, 以得到符合地质实际的储层模型。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### (二) 构造建模

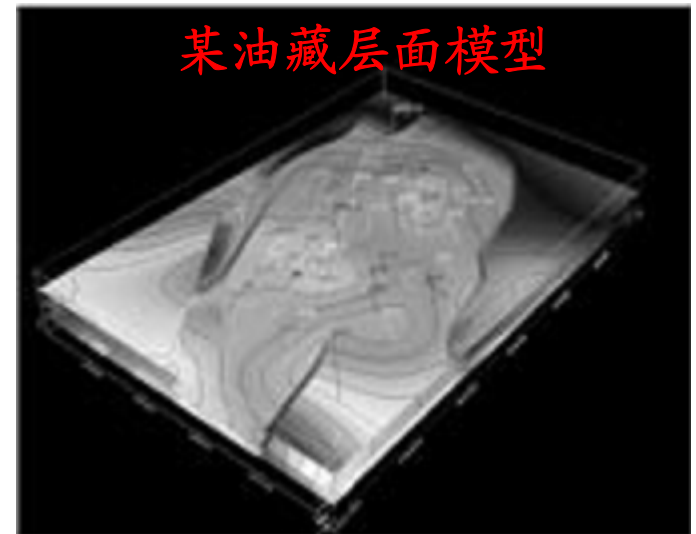
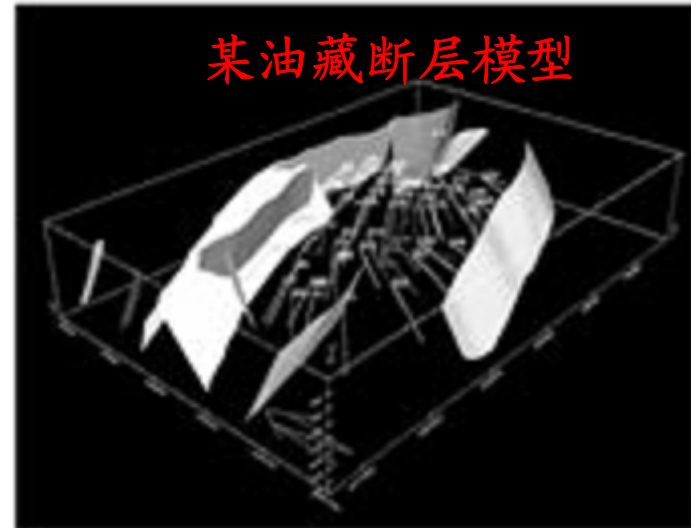
- 构造模型反映储层现今的**空间格架**特征。因此，在建立储层属性的**空间分布**之前，应进行构造建模。
- 构造模型包括：**断层模型**和**层面模型**。

#### 1、构建断层模型

此模型实际为三维空间上的断层面。主要根据地震解释和井资料校正的断层文件，建立断层在三维空间的分布。

#### 2、构建层面模型

该模型为地层界面的三维分布，叠合的层面模型即为地层格架模型。建模的基础资料主要是分层数据（即各井的层组划分对比数据）及地震资料解释的层面数据等。





## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### (三) 储层属性建模

➤ 储层属性包括:

- 1) 离散属性: 广义的相及裂缝等;
- 2) 连续属性: 即为储层参数。

➤ 方法: 应用井数据和/ 或地震数据, 按照一定的建模方法对每个三维网块进行赋值, 建立储层属性的**三维数据体**。

➤ 过程:

- 1) 建立广义的相模型 (或称骨架模型);
- 2) 建立储层参数模型。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 1、构建广义相模型

●**定义：**在构造模型和地层坐标变换的基础上，建立能够表征储层较大规模非均质性的相（骨架）模型，如沉积（微）相、砂体、流动单元等模型。根据地质概念模型、研究目的及现有的技术条件选择合适的随机模拟方法。

●在数字化的相模型中，不同相是用数字来表示的，如对于一个三维河流相模型，以1代表河道砂体，2代表溢岸砂体，3代表泛滥平原泥岩，每个网格赋予一个数字（1、2或3），则该模型为一个由1、2、3组成的三维数据体。

**值得注意的是，在相建模前要重视相类型的选择。**

●**选择标准：**既要能概括所有的砂体成因类型，又要力求简单；既要强调其沉积成因，又要重视实用与效果。研究重点不同，沉积（微）相类型或层次也有差异。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 2、构建参数模型

●在骨架（相）模型的基础上，采用相控建模技术对不同沉积微相的各种物性参数（孔、渗、饱）分别建模。这些模型主要用来表征储层各地质体或沉积微相内部岩石性质小范围的变化特征。对于连续性参数分布模型，如孔隙度模型，则每个网格赋予一个孔隙度值，整个模型则为一个孔隙度数据体。每个网格上参数值与实际误差愈小，标志着模型的精度愈高。

### 3、影响模型精度的因素

- 资料丰富程度及解释精度。
- 赋值方法。不同的赋值方法将产生不同精度的储层模型。因而，建模方法的选择是储层建模的关键。
- 建模人员的技术水平。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### (四) 图形显示

三维空间赋值所建立的是数值模型，即三维数据体。对此可进行数据—图形变换，以图形的形式显示出来。现代计算机技术可提供十分完美的三维图形显示功能，通过任意旋转和不同方向切片以便从不同角度显示储层的外部形态及其内部特点。

### (五) 模型优选

**基本原则：**

- (1) 各实现与定性地质概念模型的符合率；
- (2) 随机实现的统计参数与输入参数的吻合率，即**忠实现有数据的空间分布规律与特征**。
- (3) 能够反映储层的非均质性特征；
- (4) 抽稀检验；
- (5) 通过套合方法优选出各小层可靠的并较好反映地质微相研究结果的沉积微相模型。



## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### (六) 体积计算

地层总体积；储层总体积以及不同相（或流动单元）的体积；储层孔隙体积及含烃孔隙体积；油气体积及油气储量；连通体积（连通的储层岩石体积、孔隙体积及油气储量）；可采储量。

### (七) 模型粗化

#### 1、粗化网络的设置

在地质模型三维网格的基础上，分别按X、Y、Z方向合并网格，如将平面上4个25m边长的网格合并成1个50m边长的网格。粗化原则：

1) 粗化后的网格能反映主要的储层非均质性，如层内韵律或夹层发育部位要求网格较细；

2) 粗网格系统的总网格数满足数模器要求的节点数。





## 第四节 储层建模的程序与具体步骤



### 2、属性粗化计算

基本原则:

- 1) 标量参数 (如孔隙度) 可应用算术平均法进行粗化计算。
- 2) 矢量参数 (如渗透率) 由于具有方向性, 不能用算术平均法粗化, 而一般是通过流动模拟法如全张量法进行粗化。



## 第五节 储层建模的策略

- 储层建模的数学方法而言：确定建模和随机建模。
- 从地质约束方法而言有：等时控制储层建模（时控建模）、成因控制储层建模（成控建模）和沉积相控制储层建模（相控建模）等。
- 在实际的建模过程中，为了储层模型逼近地质真实情况，就应切实考虑这些建模策略。



## 第五节 储层建模的策略

### 一、确定性建模与随机建模的结合

随机建模不是确定性建模的替代，其主旨是对储层的不确定性进行分析与评价。在实际的随机建模过程中，为了尽量降低模型中的不确定性，应尽量应用确定性信息来限定随机建模过程，这就是随机建模与确定性建模相结合的建模思路。通过多学科资料，可以提取井间储层的一些确定性信息，如通过层序地层学研究确定层序格架、等时界面及洪（湖）泛泥岩的分布，应用生产动态资料确定井间砂体的连通性信息等。另外，为降低模型的不确定性，应尽量应用多种资料（地质、测井、地震、试井等）进行协同建模。



## 第五节 储层建模的策略

### 二、等时建模

**等时建模**是指在建模过程中，将地质体划分出若干具有不同储层分布模式的等时层，分层建模，然后组合成统一的储层地质模型（吴胜和，1998）。等时建模又可称为时控建模（于兴河等，2005）。

沉积地质体是在不同的时间段形成的。一般各时间段的砂体沉积规律有所差别（由于物源供应及沉积作用的差别）。因此，为了提高建模精度，在建模过程中应进行等时地质约束，即应用高分辨率层序地层学原理确定等时界面，并利用等时界面将沉积体划分为若干等时层，各等时层之间的沉积分布规律有所差异。在建模时，按层建模，然后再将其组合为统一的三维沉积模型。这样，针对不同的等时层进行三维网格化，可减小等厚或等比例三维网格化对井间赋值带来的误差；同时，针对不同的等时层输入不同的反映各自地质特征的建模参数，可使所建模型能更客观地反映地质实际。这就是等时约束建模的基本思路与主要目的。



## 第五节 储层建模的策略

### 三、成因控制建模

在相建模过程中充分考虑相的成因（沉积机制、分布模式及分布规律），应用相成因关系约束建模过程，即为**成因控制建模**，又称**成控建模**。

在成因控制建模时，无论是确定性建模还是随机建模，均应充分利用定量储层地质知识库资料来约束建模过程，即建立各种成因砂体在不同方向上的变差函数，比较其变程与定量地质知识库的异同，在它们具有一致性的条件下，并在由等时界面限制的模拟单元层内，**依据一定的成因模式（相序规律、砂体叠加规律、微相组合方式及各相几何学特征）**选取建模参数，进行**成因砂体的三维建模研究**，因而依据地质约束方法进行的建模过程，**强调在等时建模的基础上考虑以下几个问题：**



## 第五节 储层建模的策略

- 1. 可容空间变化 ( $A$ ) 和沉积物供给 ( $S$ ) 的相互关系 ( $A/S$ ) 对沉积物分布的影响。
- 2. 定量地质知识库建立的可靠性及其在研究区的具体应用; 保证各种 (微) 相在三度空间的变差函数与所建立定量地质知识库具有一致性 (于兴河, 2002, 2005)。
- 3. 普遍的相模式如何在研究区内得到具体应用和量化; 保证随机建模模型的相序符合地质规律, 即与通过研究所得到的垂向与侧向相序具有一致性。
- 4. 在优选相建模方法和定义相建模参数时充分体现砂体之间的成因关系, 而不仅仅是数学上的空间分布关系, 即遵循: “逼近地质真实, 而不是逼近数学真实”这一原则 (于兴河等, 1996)。



## 第五节 储层建模的策略

### 四、相控建模

相控建模即在相模型的基础上，根据不同沉积相的储层参数定量分布规律，分相进行储层参数的插值或模拟，建立储层参数分布模型（Damslesh等，1992）。

应采用“相控建模”的方法，即根据不同沉积相（砂体类型或流动单元）的储层参数定量分布规律，分相（砂体类型或流动单元）进行井间插值或随机模拟，建立储层参数分布模型。这种多步随机模拟方法不仅与所研究的地质现象吻合，而且能避免大多数连续变量模型对于平稳性/均质性的严格要求。实践证明，这是符合地质规律的、行之有效的储层参数建模方法。



# 思考题

- 1、什么是储层地质模型？为什么要建立三维储层地质模型？
- 2、如何理解储层概念模型、静态模型和预测模型？它们有何异同？
- 3、储层确定性建模与随机建模的概念是什么？其内涵有何差别？
- 4、基于目标与基于象元的随机模拟方法有何差别？
- 5、常用的随机建模方法有哪些？其适用条件和优缺点是什么？
- 6、储层地质建模的基本步骤有哪些？
- 7、什么是模型粗化？为什么要进行模型粗化？如何进行模型粗化？
- 8、如何建立逼近地质实际的储层地质模型？如何理解等时建模、成因控制建模、相控建模？