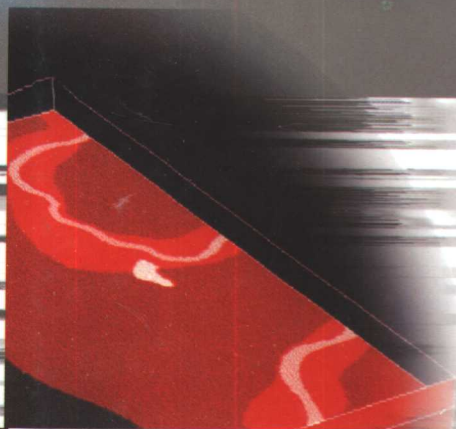
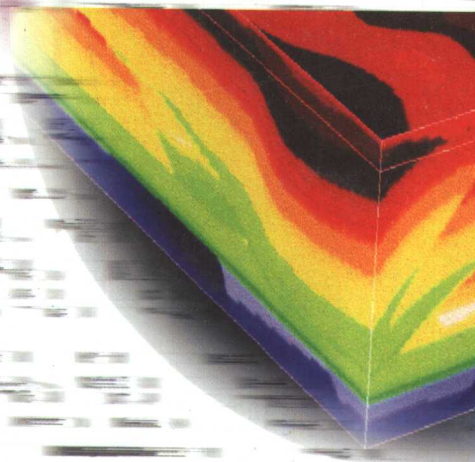


地质模型

计算机辅助 设计原理与应用



孟小红 王卫民
姚长利 胡朝顺 编著



地质出版社

国家自然科学基金

大庆石油管理局

资助

中国地质大学（北京）“211 工程”建设项目

教育部重点实验室《岩石圈构造、深部过程及探测技术》

地质模型计算机辅助设计 原理与应用

孟小红 王卫民 姚长利 胡朝顺 编著

地 质 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

地质模型计算机辅助设计原理与应用/孟小红等编著. -北京:地质出版社, 2001.1
ISBN 7-116-03357-2

I. 地… II. 孟… III. 地质模型-计算机辅助设计 IV. P628

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 86701 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑: 陈军中

责任校对: 李 玫 关风云

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 8.125 图版: 1 页 字数: 180 千字

2001 年 1 月北京第一版·2001 年 1 月北京第一次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-116-03357-2

P·2174

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)

前 言

目前, 油气勘探面临着更为复杂的条件, 其中包括地表条件复杂 (有沙漠、山地、戈壁、冻土、森林和沼泽等) 以及储层构造复杂。面对复杂、隐蔽的勘探目标, 地球科学需要尽可能地综合所有分支学科的信息, 进行多次反馈、交叉研究; 而许多油田专家队伍之间的工作方式是流水线式的, 即地球物理→地质→油藏工程。这种工作方式虽然使各学科的职能非常明确, 但不利于学科之间的信息交叉与反馈; 当有新的资料加入时, 很难返回重新工作。因此, 长期以来有关专家队伍一直呼吁重视软件通讯、公共数据通道和三维可视化, 地质模型计算机辅助设计系统便应运而生了。

地质模型计算机辅助设计系统包括四个关键技术: 公用的地质模型、各学科间的通讯、完整的数据库和公用的三维可视化窗口。通过共享数字化地质模型, 专家们能更容易地实现学科间的交叉循环, 这意味着油田现存工作方式的彻底改变。国外大型石油公司的地球科学专家们预测, 在不久的将来, 以地质模型为基础的数据采集、处理和解释将成为石油勘探技术各环节的纽带, 对石油工业的变革起到至关重要的作用。目前, 国际上在地质模型计算机辅助设计研究方面, 以 GOCAD (地质目标计算机辅助设计) 研究计划最具代表性。

GOCAD 研究计划是 1988 年法国 Nancy 大学的 J. L. Mallet 教授推出的, 目的是要开发一种新的地质目标计算机辅助设计方法, 以适应地质、地球物理和油藏工程的需要, 为多学科的综合研究提供主要技术支撑。在进行地质体建模时, 需要利用具有不同可信度和不规则分布的复杂数据对地质体的几何形态和物性特征进行插值, 如测线与测线之间建模、井间建模、非均匀储层参数建模等。经典 CAD 软件虽然可以用来创造非常漂亮的模型, 但它不考虑任何约束, 设计 CAD 方法 (Bezier, 1974; de Boor, 1978; Fraim, 1988) 的数学家们的目标仅是提供交互模拟漂亮图形的工具, 而没有考虑数据体本身的复杂性; 另外经典 CAD 方法只注意模拟物体的几何特性, 并不关心它们的物理性质。在地质科学中, 我们并不是追求好看, 我们关注的是由已知信息引入的约束, 而且必须同时模拟地质体的几何特性和物理性质, 因两者在很多情况下是相互联系的, 因此对于地球科学中的特殊需要, 经典 CAD 方法是不适用的, 必须寻求一类特殊的数学模拟方法。针对这一问题 J. L. Mallet 教授于 1982 年提出了离散光滑插值 (DSI) 技术, 这成为 GOCAD 研究计划的核心技术。此外, 在 GOCAD 研究计划中采用了适应能力很强的三角形网剖分和四面体剖分技术, 这对于模型的自动修改和三维可视化十分方便。GOCAD 研究计划中还包括了 DSI 方法在地震射线追踪、叠前深度偏移、时间偏移, 以及测井、地震、地质综合研究确定地质相方面的研究。目前, GOCAD 正向着非均匀网格波传播、非均匀网格反演等方向发展。在三维地质体建模领域, 国际上还有一些比较先进的三维可视化系统, 但因缺乏对地质体进行切割、变形等指向目标的操作功能, 尚不能完全满足地质建模的需要。虽然还不能说 GOCAD 中的建模方法就一定代表着地质体建模的惟一的发展方向, 但必须承认, GOCAD 在

11/11/01

建模数字化方面已大大向前迈进了一步，为我们深入研究数字化建模开辟了道路。

国际勘探地球物理学家协会（SEG）和欧洲勘探地球物理学家协会（EAEG）对 GOCAD 工作非常重视，在 1992 年末成立了 SEG/EAEG 3D 建模委员会，以 GOCAD 为依托开展了三维 SEG/EAEG 建模工程（SEM）。在 1994 ~ 1998 年间，该委员会分别发表了三次 SEM 进展报告、修改报告以及三篇阶段报告。SEM 建模工程目的之一是为研究和开发各种大型三维叠前深度偏移和速度估计提供测试工具，为此美国和欧共体先后推出了 Marmousi 模型、EAGE 盐丘模型和 EAEG 推覆体模型等，这些模型用来检验来自不同研究单位的算法、了解复杂介质波传播和选择采集参数，对三维叠前深度偏移和速度估计的发展起到了重要的作用，并促进了构造、沉积、石油地质等地学多学科的定量研究和不同单位合作研究。尤其需要提到的是在 GOCAD 模型基础上，三维叠前深度偏移在墨西哥湾盐丘下的成像结果轰动了全世界；英国北海在 GOCAD 模型器上利用多重走时和立体层析技术，大大提高了速度模型建立的精度，从而提高了复杂构造下储层成像的准确度，为新一轮精确刻画速度模型创造了条件。目前，GOCAD 研究计划和 SEM 工程的许多研究成果已经被国外的许多地球物理公司和石油公司使用，到 1999 年 GOCAD 计划已得到世界上 43 个大公司和 28 所大学的支持。

我国地质模型建模工作一直得到老一辈地球科学工作者的高度重视，傅承义院士对地震预报模型问题非常重视；刘光鼎院士精辟总结了综合地球物理的研究思路，提出地质模型是连接地球物理、地质、地球化学的纽带之一。石油地球物理勘探局地调二处，开发了以模型为基础的数据采集实用软件；石油地球物理勘探局等单位在研究三维叠前深度偏移时，使用了 EAEG 推出的二维 Marmousi 模型。原地矿部物化探研究所开发的 PandaCAEX 计算机辅助勘查系统，为三维可视化应用提供了一些经验，但该系统主要适应于简单的单体模型。总之，近年来国内的模型工作已经开始，但从研究程度和应用程度上看，与国外相比差距甚远。尤其是在地球物理资料处理解释方面，国内现有的处理系统，基本上是以处理方法为主的，没有面向地质模型，缺乏丰富的图形库，使人机交互和可视化功能不完善。1996 年中科院地球物理所和胜利石油管理局在国家自然科学基金重点项目“复杂地质体”中，开始跟踪研究 GOCAD。1997 年国家自然科学基金重大项目“油储地球物理理论与三维地质图像成图方法”将地质模型计算机辅助设计作为研究内容之一。1999 年，中科院启动知识创新工程重点项目，也将引进和开发 GOCAD 作为重要内容之一。

GOCAD 的主要应用领域包括：①地震资料处理中的建模；②地质解释中的建模；③油藏模拟中的建模。从我国实际情况看，这三个领域可以在以下方面发挥重要的作用：①东部深层复杂地质体和特殊岩性储层天然气勘探；②中部大型气田勘探；③西部山前逆冲带油气勘探。此外，GOCAD 还可以在航天、环保等领域发挥作用，并成为数字化地球的重要的研究工具。

为适应勘探地球物理发展的需要，作者收集 GOCAD 已发表的重要论文，进行了系统编辑，并补充了作者的研究工作和国内有关的研究成果，试图填补我国在这个领域里参考书的欠缺。本书分为六章，第一章介绍了地质模型建模的有关概念和 EAEG 建模的进展情况。第二章系统介绍地质模型建模的常用剖分技术——Delaunay 剖分的基本概念，性质，快速算法，约束 Delaunay 剖分和三维约束 Delaunay 剖分的最新成果：灵活约束四面体化法。第三章系统介绍了地质模型建模的核心技术——离散光滑插值，给出了该方法的一般

化形式、局部叠代算法和在地质体建模方面的应用。第四章介绍了在 Delaunay 剖分和离散光滑插值的基础上对断裂等复杂构造的建模方法,包括被断裂切割的不连续界面建模、三维构造建模、复杂构造展平、建立 G 光滑曲面和光滑曲率插值等。第五章介绍了在三维模型器上进行的地震资料处理(深度偏移、射线追踪)取得的成果,包括四面体射线追踪、强不均匀介质射线追踪和三维深度偏移中的利人工程学等。第六章介绍了在三角剖分和离散光滑插值的基础上的物性参数建模,包括河流砂体建模、沉积相建模、井地联合反演储层参数等。

本书的目的在于将 GOCAD 关键技术系统地介绍给有兴趣从事建模工作的研究人员和研究生,使之了解 GOCAD 研究计划的思路、问题、可能的解决方案和趋势,以加快我国在这一领域的研究,并促进我国勘探地球物理与世界同步发展。

作 者

2000 年 5 月

目 录

前 言

第 1 章 地质模型建模	1
1.1 对公用地质模型的需求	2
1.2 什么是地质模型	4
1.3 三维地质模型建模元素	4
1.4 维数	8
1.5 模型表示法	8
1.6 SEG/FAEG 三维建模工程进展	10
第 2 章 Delaunay 剖分	15
2.1 Delaunay 剖分及其性质	15
2.2 Delaunay 剖分的 Bowyer 算法	16
2.3 三维 Delaunay 算法	17
2.4 快速 Delaunay 剖分	17
2.5 约束 Delaunay 剖分	18
2.6 从 Delaunay 剖分中减去一个点	19
2.7 曲面切割方法	20
2.8 灵活约束的四面体化	23
第 3 章 离散光滑插值方法	31
3.1 问题的提出	32
3.2 离散光滑插值 (DSI)	33
3.3 DSI 方程解的惟一性	35
3.4 DSI 方程的局部形式迭代算法	38
3.5 引入模糊信息约束	40
3.6 有关权系数的选取	41
3.7 广义 DSI	43
3.8 DSI 方法在几何建模上的应用	45
3.9 DSI 方法的一般化形式	49
3.10 实例	50
第 4 章 复杂地质体几何建模	53
4.1 断裂构造建模	53
4.2 构造 G^1 连续的光滑三角剖分曲面	66
4.3 不规则三角剖分曲面上光滑二阶导数的计算	70
4.4 三维复杂古构造重构	72
4.5 由三维地震构造复杂层位	76

第 5 章 以模型为基础的地震资料处理	79
5.1 在 GOCAD 深度模拟器上进行三维地震反射层析成像	79
5.2 复杂曲面上使用单纯形实现三维两点射线追踪	92
5.3 在三维深度偏移中的利人工程学	96
5.4 在三维地质模拟器上进行时间偏移模拟来检验不同的速度模型	101
第 6 章 复杂地质体参数建模	103
6.1 复杂三维非均匀介质参数化	103
6.2 以油藏模型为对象的岩石物性模拟	111
6.3 综合测井、地震和沉积学数据的沉积相反演	117
主要参考文献	122

第 1 章 地质模型建模

目前许多油气田都是由交叉学科专家队伍管理，这些队伍之间的工作流程是线性的（图 1.1）。地球物理工作者进行地震勘查并解释资料，地质工作者利用地震解释的界面框架和钻井资料在图形软件包中编辑、重构地下界面，然后储层工程师将其按比例放大用于流体运移模拟，这样生成的最终储层模型与最初解释的地震界面和属性几乎无关。当新的测井资料引入新信息时，很难快速地更新模型。在流程的最后阶段，由几何模型和元素模型进行的油气储量估计很难协调一致。

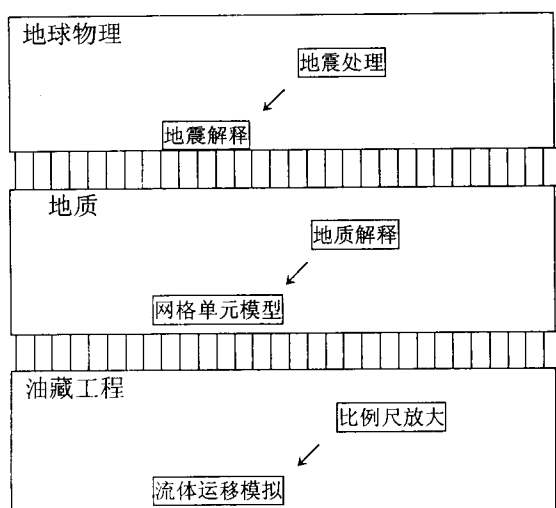


图 1.1 交叉学科之间线性工作流程图
(Steve Garrett 等, 1997)

采用三维地质模型计算机系统可以改变这些工作流程。通过共享同样的数字化三维表示的地下情况，专家队伍能更容易地实现学科间的循环（图 1.2），快速地将新信息结合到已存在的模型中。

图 1.2 的大循环的核心在于四个关键的计算机技术：

- 公用的地质模型
- 应用部门间的通讯
- 完整的数据库
- 公用的可视化窗口

长期以来，许多交叉学科一直强调软件通讯、三维可视化和数据通道的重要性，我们相信地质模型问题将成为今后工作的主要的问题。

通过使用共同的地质模型，将各交叉学科联系起来，每一项技术的应用都将影响共用

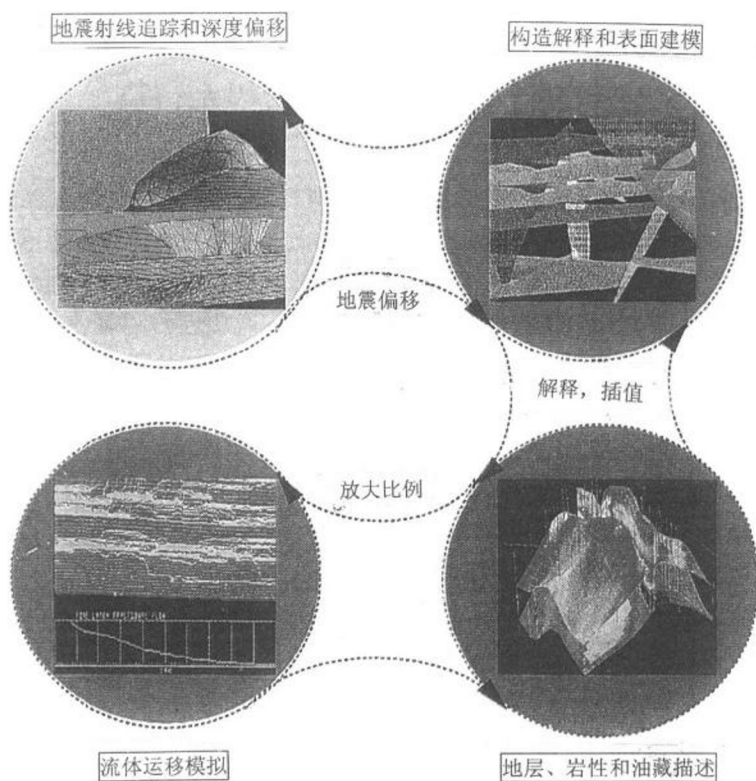


图 1.2 交叉学科之间循环工作流程图
(Steve Garrett 等, 1997)

地质模型，进而影响其他学科的应用。

1.1 对公用地质模型的需求

用公用地质模型表示三维地质体在技术水平上是可实现的，然而在实际操作中应用三维地质模型技术需要改变已有的规范和工作流程、软硬件实体以及连续投资前沿研究。为了证明这样的投资是否正确，需要说明该技术能增加效益并实质性地压缩资源评估周期。

在斜井钻探方面。许多油田用偏离、延伸和横向钻井生产。在使用这些技术时，确定三维地下实体，需要横切一系列的由断层、层位、流体接触面和油藏物性定义的目标（图 1.3）。在多个独立图件上目标的相互关系很难建立等问题，使用目前的二维横切面和成图工具来进行规划和监测这些钻井目标是很麻烦的，而利用三维工具则更有效。

当钻井完成后，将提供新的信息，它不可避免地与原预想有误差（或大或小）。为了改进模型以得到更好的钻井预测，在钻井期间需要进行速度模型和储层几何特性的实时局部更新。在整个钻井规划和监控过程中也需要实时管理模型的可变性。

在复杂构造评价方面。许多油气藏被断层和断裂分割，这些断层会扭曲地震射线路径，控制油藏储层体积分布以及充当流体流动的障碍或管道。

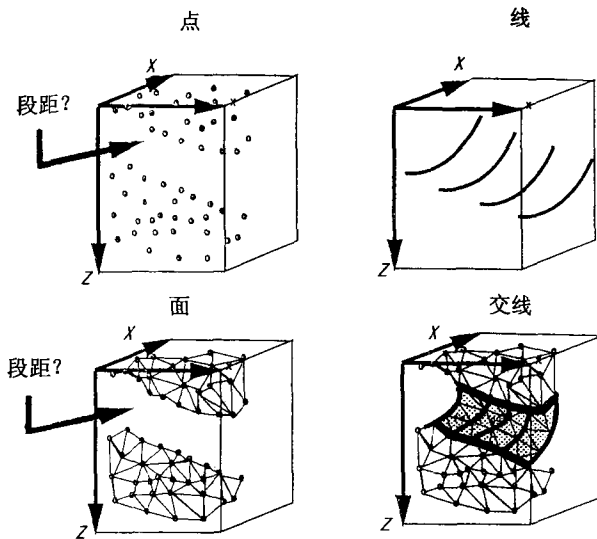


图 1.3 地质模型元素

(Steve Garrett 等, 1997)

严格表示一个地质目标需要全方位描述它的几何形态和拓扑结构

精确的层位、断层和它们之间的交线建模是真正的三维问题。在二维图形系统中，油藏断层下面的部分被当作楔入区域，在计算整个储层体积时需要特殊处理。在三维系统中，油气藏目标由交线、封闭层位、断层和流体接触面所约束，以确保准确计算出储层总体积。

在本书介绍的方法中，使用三角剖分曲面模型描述断裂构造，从而加速了在地震射线追踪、深度偏移、地震解释、构造恢复和地质体建模间的循环。构造和编辑断层及层位曲面在解释过程中进行，这将大大地减少这类工作的周期，特别是在存在盐丘的区域 (Wyatt 等, 1994)。

现在，许多模拟模型建立在顺序网格的模型环境中，这些网格完全不能控制断层的几何和拓扑性质。在公用的模型环境中，用三角剖分曲面将断层的性质（位移、断层封闭潜能）绘制到油藏网格的相应表面上，以便计算流体流动的渗透速率，这使建立断裂油藏的周期缩短。

在油藏监控研究方面。除了用四维地震监控油藏变化外，很少有一整套从地震到模拟技术被用于单一资源。四维地震油藏监控将图 1.2 中的所有圆框合成一个集成的大循环，包括地震资料获取、解释，油藏描述，建模和流体流动模拟。这个循环随着获得更多地震勘探资料，更多的钻井，以及通过生产测得的流体流动数据，将不断重复，并且，当这种工作成为管理油藏的更标准方式时，将清楚地确立公用地质模型环境的商业价值。

可视化在决策制定中的作用。目前，许多决策的制定基于平面图、剖面图和电子表格。在公用可视化窗口中显示所有地质模型实体，通过对模型放大、缩小以及在不同比例

下观察三维实体，可以很快确定对象间的连续性，评价对象间的关系。进行资源评价时，这是描述一个地质模型的非常有力的途径。例如，设计一口勘探井时，可以沿井迹和地震资料（排列、垂直排列和时间切片）来观察曲面（层位、断层、接触面、延续边界）。不同可能性的油气接触面、曲面解释以及地震速度模型可以产生不同的油气藏对象。可以设计井位以测试不同可能结果的最优化组合，也可对实体进行模型操作处理以测试潜在的可能性。

1.2 什么是地质模型

地质模型通过量化以下信息来描述地质对象：

- 几何形态；
- 拓扑信息（地质对象间的关系）；
- 物性。

一个计算机地质模型包含的元素层次有：

- 点（拾取）；
- 线（井路径）；
- 曲面（层位面、断层面）；
- 交线（层面与断层交线）；
- 闭合岩石区域（断块）；
- 网络（规则网格、地层网格）；
- 物性（速度、孔隙度等）。

一个地质模型就是由这些对象的各种信息综合而成的一个复杂的整体。许多三维地质模型是在一维和二维的数据解释后建立的。当地质学家在解释中而非解释后能交互建立和编辑三维地质模型对象时，建立模型的周期将缩短。因为任何三维研究——地震、构造、地层或油藏，花费的大部分时间是在模型的构造和有效的编辑上。

1.3 三维地质模型建模元素

点。点是最简单的模型元素（图 1.3）。点通常来源是一个三维地震解释系统，以现代勘查的规模，给定表面上所含道数以及由此产生的点通常多达百万，为了在现在三维模型系统中处理这些点，关键要找到方法以减少用于描绘一个层位曲面的所需点数。

线。两点定义一条线段（图 1.4），许多线段形成一条线或一簇线。通常的三维线包括地震射线路径，层位与断层交叉线，井迹。模型系统的最主要的输入之一是断层向量，这个断层轨迹由三维地震数据体中的二维切片的地震解释中得出（图 1.3）。现代三维地震勘探和处理技术揭示了断层模式的巨大复杂性，所以很难决定一个二维切片中的哪一个断层向量与下一个二维切片中哪个断层向量相关的优先顺序，关键问题是在三维模型环境中找到连接解释的断层线来创建合理的断层面的方法。

在传统的制图方法中一个层位上的断层多边形是一个公共输出，根据独立的不同的二维图中画出的断层多边形中重构合理的断层面是很难的，通常是手工的。理想情况下，应

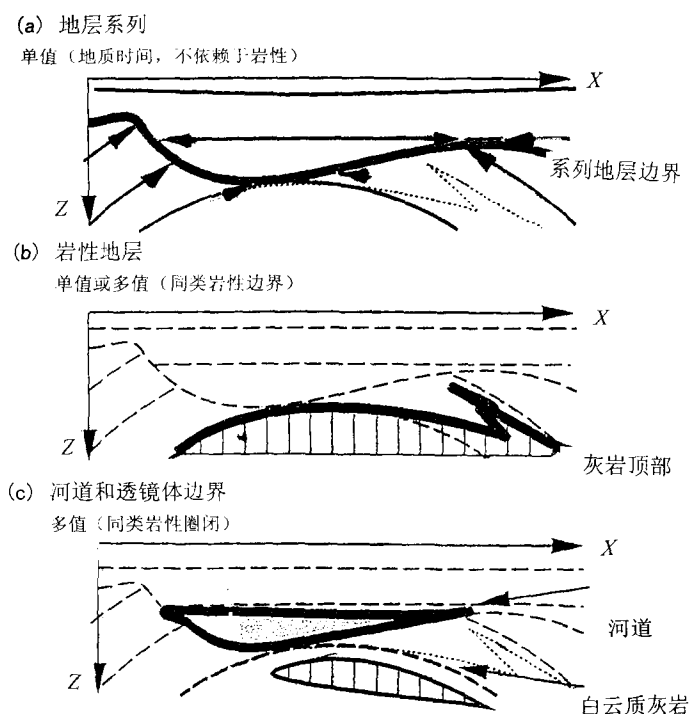


图 1.4 多值地层表面

(Steve Garrett 等, 1997)

既在 (x, y) 处有多于 1 个的 z 值, 这对描述管道、透镜体等的边界是理想的。习惯上用的二维作图系统只允许单一的 z 值, 这对精确模拟有些地质特征是困难的

该是三维空间中层面和断层面相交成断层多边形, 然后输出到二维绘制成平面图。

曲面。虽然网格化的单值二维曲面表示目前在石油工业中广泛应用, 但基于由三角形集合构造三维曲面的三维建模系统已经被越来越多的使用。三角剖分曲面是一个非常有效的方法, 可用于表示诸如油气接触面的简单曲面, 如边界垂直曲面, 或没有扩展到整个区域的曲面 (尖灭断层)。三角剖分曲面也可用来表示多值曲面 (图 1.3), 它们通常来自于围绕河道和礁体等对象的岩石层位边界, 挤压环境的构造边界或盐岩体的边界 (图 1.4)。

生成三角剖分曲面的困难包括建立点线间最优连接和同时处理重叠和错误连接的点和线, 此外产生以断层约束为边界的有效的三角剖分曲面也是有困难的。

交线。有许多种地质交线 (图 1.5), 在一个模型中封闭的交线包含由两个相交曲面共享的点和边界, 严格的交线最好是用一个曲面切割另一个曲面来产生。

一个面切割另一个面——如断层切割层位, 在三维空间的解是一个困难的问题。Wilson (1998) 认为, 通过细心选择数据来改变三维交线算法是可能的, 因为这种算法需要使用搜索法, 用户可以通过逼近或越过搜索的间断点来解释曲面; 而且可以在用户的特定容许度中计算交线。在处理含噪数据时将会产生新的问题——例如, 亚平行层位在地震解释中交叉是不一致的。在没有优化的三角形网格曲面上, 如长的或过瘦的三角形, 将加剧

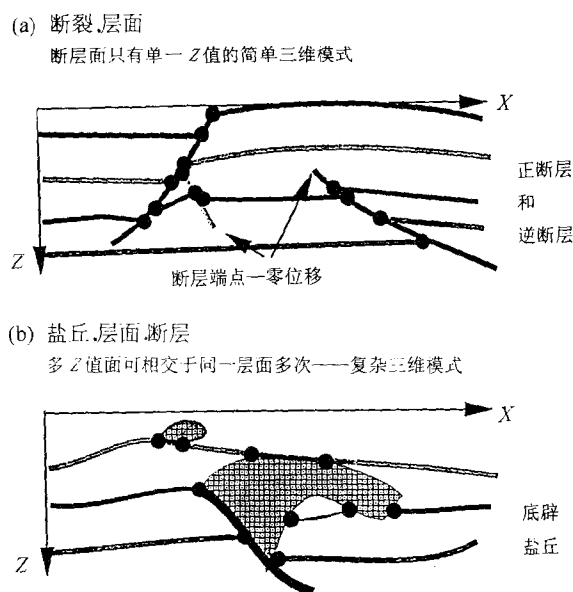


图 1.5 构造交线

(Steve Garrett 等, 1997)

由于断裂的存在导致多条复杂的交线, 利用常规的二维绘图系统不能模拟垂直断裂、倒转断裂和多值地质体等复杂构造。在有多条构造面和层面相交的情况下, 需要有效的和可行的面-面切割算法

问题的难度。

在进行曲面切割时将涉及删除、平滑、三角剖分和外推。如果正确地执行这些步骤, 切割操作通常快速而无需费力。当被切割的曲面多值、含噪、三角形剖分不良和未充分外推时, 切割操作往往难以完成。

拓扑。从地质科学角度看, 拓扑是地质对象间关系的表格。层位 (上覆、下伏、切断) 间地层学关系在建模时由解释人员记下, 形成一个简单的拓扑表, 也可以通过绘制一系列的草图来量化结构框架、建立结构关系。

用拓扑结构建模有三个途径, 一个理想的地质模型系统允许使用所有的这三种方法:

(1) 在全交互系统中, 解释人员建立断层和层位的切割线, 计算机得到相关的拓扑关系。这对于在地震解释期间的建模是理想的。

(2) 批处理系统, 解释人员输入结构表和地层岩性拓扑表, 计算机用这些指令集合或关系表来进行交线操作。这种方法在试图从复杂的断层区域的图件中重构三维模型是很有用的 (Hoffman 等, 1996)。

(3) 全自动系统, 所有曲面交叉根据相关的拓扑关系都是自动算出而不需要用户干预。这对具有适当先验条件的一些复杂曲面的模拟来说是很理想的。

拓扑也可视为允许这些地质关系合理储存的数据结构。目前最常用的数据结构是层状结构: 模型全部用界面和层来表示, 这里的层在现实中是不一定存在的, 曲面边界曲面必须一致以便该层具有零厚度。这种层状结构与二维流形具有相同的拓扑, 这种数据结构称为流形拓扑。另一方法是非流形拓扑, 所有曲面在交线处切割成允许层位和断层共享交线

的子曲面 (Weiler, 1988), 并且层位在断层错断处消失。评价地质模型系统的优缺点往往决定于开发者软件中描述地质对象所用的拓扑结构。

块体。块体是指由交叉曲面封闭的空间体积, 一个块体可以是断层块、层、盐体或通道和其他可能的对象。拓扑表也存储哪个块体被哪个曲面或子曲面封闭。这使对曲面或子曲面的查询以确定地下某一点在哪个块体成为可能。从而通过查询来确定分析目标的合适分布, 网格或功能。

块体描述共享相同的物性表达的地质体部分, 从块体角度来看, 盐体明显有别于封闭的沉积岩, 从储层角度看, 砂充填的管道与封闭的页岩有不同的物性。如果目的是钻井, 则希望准确了解何时我们会遇到超压岩石块体或改变机构物性的块体。当进行地震射线追踪时, 在某一曲面的折射一定程度上受该曲面包围的块体的地震速度所控制。

网格。四点定义一个四面体, 理想情况下, 由曲面和交线定义的非流形块体能由四面体充填, 该四面体完全匹配于三角形表面的边界。实际上, 严格的非流形四面体网是很难构造的, 并且在计算机中占很大存储空间。而且, 油藏描述和流体流动应用在四面体情况下更难开发, 所以这些工具目前需要将三维对象的物性放在一个规则网格 (流形拓扑) 上。

一些曲面和网格之间的一致性可通过用户定义的上覆、下伏和切断关系的拓扑表给出, 这种关系能用于产生网格的内部层。从几何上看, 网格节点可能不能准确地匹配三角形的节点, 虽然通常地层表面的几何性质是足够平滑的, 而且错误连接的很少。通过使用参数化或规则网格化曲面可以实现网格和地层曲面之间几何和拓扑的完全一致。

在存在断层时, 规则网格 (流形拓扑) 的主要缺点很明显表现出来。网格与封闭断块区域的三角剖分曲面不一定有完全一致的几何和拓扑。使用非流形网格能达到这种一致, 其中网格沿断层的单元不能以顺序方式接触下一个单元, 然而, 这将造成油藏描述和流体流动模拟应用的困难: 它要求网格单元以顺序方式彼此接触。

属性。地质模型包含由点、线、表面、块体和网格携带的地质属性。地质属性按其不同插值方法可分为两类。

平滑属性可以是常数, 也可在给定块体内随深度或横向上逐步变化。从区域的或油田范围看, 可以通过以一个曲面 (对于地震速度, $v = v_0 + k \cdot z$) 为参考或光滑地插值将属性参数化, 例如:

- 地震速度;
- 地层压力;
- 地层温度。

从更精细的储层角度来看, 非均匀属性插值 (地质统计学、神经网络等) 是更合理的, 非均匀插值的成败紧密地依赖于携带属性的网格的几何特性。例如:

- 地震速度;
- 地震属性;
- 孔隙度;
- 渗透率;
- 构造倾斜。

某些属性同时要求光滑和非均匀插值, 例如, 地震速度经常通过两种方式描述, 一是

合理的地震成像所需的光滑处理场，另一种是做出地震图像并且解释曲面与井准确拟合的所需的非均匀场。

对于储层流体流动模拟研究，关键属性是网格单元的渗透率和界面的透过能力，在不同学科间进行充分循环的工作流程的一个障碍是动态的流体流动属性很难与静态的属性，如孔隙性或断层封闭潜能的度量关联起来。在断裂储层情况下则更糟，这时模拟网格的顺序性与地质结构的复杂非流形性不一致。基于四面体的有限元精细模拟算法则最终将提供模型一致性问题的长期解决方法，其中四面体顶点和面与三角剖分边界曲面的顶点和面应该完全一致。

1.4 维数

构造和地层框架模型在现今是静态的——它们可以通过变形，复原和地质时期的其他模型来验证。地质时期的模型经过更新后才能与现今的新的静态数据——地震或测井——和新的解释吻合。根据地震比例尺，这些模型通常饱含主要断层和地层边界。

相反，油藏描述和流体流动模型是动态的，流体流动由线（流管）或曲面（流体前缘）描述，但实际的油藏描述和流体流动模型只是四维实体贯穿整个连续性演化时间的瞬间的三维表示。同样，压力、温度、饱和度和其他属性本质上也是四维的。此外，油藏描述和流体流动模型也必须处理不同尺度的数据，包括控制流体在井孔周围流动的细粒层到整个区域模型，以便在油田开发上进行精确设计。

当组合不同的静态和动态模型时，尺度和维数的差别经常导致针对地质模型系统的不同任务采用不同的方法。一方面，地震射线追踪、深部成像、速度模拟、构造解释和表面建模（图 1.2）与三角剖分曲面模型紧密相连；而另一方面，地层、岩性、油藏描述和流体流动模拟（图 1.2）与规则网格模型相连。

1.5 模型表示法

复杂地质模型的表示是叠前偏移、速度估计、地质解释、地质模型可视化的基础。复杂地质模型的表示是叠前偏移、速度估计、地质解释、地质模型可视化的基础。从国内外速度模型的建立方式看，在叠前偏移处理初期，对地下构造认识程度较低、而速度模型的不确定性较大，此时，为了加快速度模型的建立，通常采用样条函数（B 样条或 Hemite 样条）为基础进行速度建模。这时候，与此模型相对应的走时计算以快速的有限差分上风算法、最小走时算法和初射单走时插值法为基础。在叠前偏移处理后期，速度模型中增加了许多地层界面，速度模型的横向变化也比较大，在这种复杂模型中，为了正确成像，不能用初至能量和最大能量走时作为叠前偏移的工具，而要采用多重走时，这时，为了使构造边界更为清楚，需要提出比样条函数更为精细的速度描述方法，因而需要块体描述技术。块体模型的特点是内界面少、计算射线交点少，从而速度较快，且能描述复杂模型。但块体模型的形成，又有相当大的难度；如何由通常的构造模型（地层界面加断层面）给出块体描述并未得到解决。在断层形态复杂、断层出现尖灭等情况下，如何迅速地建立起块体与块体之间的相邻关系，如何判断点在块体内还是块体外、块体边界的形成，需要建立系

统的方法理论。

由于不同方法的要求不同,地质模型有不同的表示方法。这些表示方法可总结如下:

构造模型。包括地层层面的描述、断层的描述,该模型是用地震资料进行解释后所得结果。当断层形态比较简单时,该模型可以近似归结为层状介质模型,从而用于叠前偏移和速度估计,如帕若代姆公司的速度模型。

块体模型。每一块体由上下两个曲面描述,块体通常为凸体,因而可以通过点的坐标与边界面方程来判断点的内外。该模型由复杂地质体项目立项时提出。目前对该模型的表示法正在进一步工程化和完善。该模型便于射线追踪,射线追踪时交点少,计算速度快。但在三维情况下,如何能快速形成该模型表示,以及块体由多个曲面拼合时,该模型还需进一步研究。本文介绍初步解决这些问题的方法。

光滑参数模型。介质参数的空间变化用样条函数描述,样条包括 Hermite 样条或 B 样条。目前欧洲油储计划使用这种描述进行射线追踪,动力学振幅计算,多走时偏移,振幅保真偏移。光滑模型比较适合射线理论,而构造模型的信息主要来自于偏移或地震短波长场,射线理论只适合于反演光滑速度分布。

不同表示法数据之间的转换。为了便于兼顾上述各种模型表示的优缺点,我们提出在地质模型基础性软件设计时,应同时包含这三种表示法,并能实现他们之间的相互转换。这种转换完全可以借助四面体模型作为中介来进行。

四面体单元模型到块体模型。将四面体集合放在一个数据结构中,由于 Delaunay 剖分的特殊数据结构,每个四面体的相邻四面体很容易找到。因此这个四面体的外边界及以上三角形单元的相互关系很容易找到,因而很容易建立这个外边界的三角形网描述,当外边界的形态比较简单,可以将其用样条函数逼近,从而得曲面边界的块体表示。

块体到四面体模型。在块体边界上取一定数量的离散点,利用约束 Delaunay 剖分可以建立含边界的四面体表示。

四面体单元模型到光滑参数模型。由于利用 Delaunay 剖分的四面体表示很容易进行插值,所以很容易变为光滑模型。

光滑参数模型到四面体单元模型。利用光滑模型中的等值线,可以得到光滑模型的曲面描述,而曲面描述借助 Delaunay 剖分和约束 Delaunay 剖分很容易化为四面体描述。

四面体单元模型到构造模型。由于约束 Delaunay 剖分中,四面体单元模型的各个面中,必然包含构造面,利用四面体结点的速度值,很容易将这些构造面识别出来,从而表示出来。

构造模型到四面体单元模型。利用约束 Delannay 剖分将构造面约束和其上的点进行网格化,从而可得四面体模型(本文第二章)。

三维地质模型系统将日益广泛地建立在交叉学科资源管理计算机应用的核心上。平面图、剖面和其他二维表示将仍是有用的工具,但将成为相容的三维模型的子集。

全自动或批处理系统有助于快速建立复杂的几何模型。引入诸如钻井提供的新信息而对模型进行实时修改,需要充分的交互式方法。

在不久的将来,随着使用由几何和拓扑支配的地质模型的工作实践和应用,将可享受公用地质模型的全部优越性。三角剖分曲面,严格的交线和封闭块体可用于地震速度模型,射线追踪,深度偏移,地震解释,成图,构造分析以及地层框架构建。这将大大方便