

建立盆地三维构造—地层格架的插值方法

田宜平 袁艳斌 李绍虎 吴冲龙

(中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

摘要: 建立盆地三维构造—地层格架是进行三维盆地模拟的关键技术之一。为了使一系列二维地震解释剖面转化为盆地的三维构造—地层格架, 必须选择有效的内插外推方法, 而插值方法的选择和空间分析的实现依赖于空间拓扑结构。在探讨基于 B-Rep 模型的盆地三维空间拓扑结构表示法及图形编码准则的基础上, 引进了适合于构建盆地三维构造—地层格架的几种形态插值方法, 并提出了一种新的方法——相似变形插值法。这些方法曾成功地应用于珠三盆地三维构造—地层格架的模拟, 能够很好地支持包括矢量剪切在内的各种空间分析。

关键词: 盆地模拟; 三维模拟; B-Rep 模型; 空间拓扑结构; 形态插值法; 盆地地层格架。

中图分类号: P544⁺.4; P628⁺.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)02-0191-04

作者简介: 田宜平, 男, 讲师, 1972 年生, 1996 年毕业于中国地质大学研究生院, 获硕士学位, 主要从事盆地模拟研究和三维模拟软件开发。

盆地模拟的近期发展, 主要是从单因素的有机地球化学模拟, 转变为多因素的盆地演化综合模拟; 从一维空间的单井模拟, 转变为二维空间的联井模拟, 并且正在向三维空间的区块或盆地整体模拟发展^[1]。进行三维盆地模拟, 必须首先建立三维的盆地构造—地层格架, 但目前国内外还没有成熟的三维盆地构造—地层格架的模拟方法可供利用, 这其中既有计算机可视化技术难点, 也有地质体三维构形和数据升维本身的技术难点^[2]。本文对此进行了系统的探索性研究, 在现有的计算机可视化技术基础之上, 建立了几种基于 B-Rep 拓扑结构模型的有效插值方法, 并且在计算机上很好地再现了盆地的三维构造—地层格架形态。

1 盆地构造—地层格架三维拓扑结构的表达

沉积盆地构造—地层格架的三维形态极为复杂, 其中不但包含许许多多的界面, 例如各种断层、地层和沉积体界面, 而且相互间关系错综复杂、变化多端。要正确地表达这种复杂的空间形态和关系, 需

要首先解决描述这种形态和关系的拓扑结构。目前在常用的三维数据结构模型中基于体表示的三维混合结构模型, 是近年来三维 GIS 领域所取得的新进展^[3~6]。

如前所述, 盆地三维构造—地层格架模拟的数据基础是一系列二维地震解释剖面, 只有经过插值模拟之后才具有三维特征。因此, 我们既不能将其简单地作为二维数据结构来处理, 也不能直接进行三维数据结构描述, 需要寻找一种具有层次结构的, 既能描述线和面又能描述体, 而且在线—面和面—体转换之后, 拓扑结构得以保持的方法。相比之下, 边界代替(B-Rep: boundary replacement)模型较为适合。该模型采用实体的边界来代替实体, 并且通过拓扑关系来建立各边界的联系。空间对象通常可以分解为 4 类元素的集合, 即点、线、面和体, 每一类元素由几何数据、类型标志及相互间的拓扑关系组成。虽然在一般情况下确定元素间关系十分困难, 要将观察数据转换成边界表示几乎是不可能的^[4], 但由于其边界表示具有层次结构, 再加地质体在二维地震解释剖面上都是以边界线表示的, 元素间的拓扑关系早已经确定, 只要采用正确的编码原则, 就可以取其所长而避其所短, 实现二维拓扑结构的三维化表达。图 1 所示的被“Y”字型断裂破坏的地层格架剖面, 可以用来说明 B-Rep 模型在盆地内部三维拓扑



图 1 B-Rep 模型在盆地构造-地层格架拓扑结构描述中的应用

Fig. 1 Application of B-Rep model to topological structure description of tectonic-stratigraphic framework of basin

结构描述中的应用。

在图 1 中, F_1 和 F_2 组成典型的“Y”字型断层, T_2, T_4 和 T_5 为地层界面。图中有 3 个封闭的实体, 分别为 D_0-1, D_1-0, D_1-1 。根据 B-Rep 模型, 实体的编号以层位为序, 从上到下为 $0, 1, 2, \dots$; 如果某层又分好几块则用“-”来区分, 例如: D_0-0, D_0-1 和 D_0-2 等; 同样, 实体边的编号规定上边为 1, 下边为 2, 左边为 3, 右边为 4。某边又分成几段线段, 则编号用“-”区分, 如 B_3-1, B_3-2 等。 F_1 和 F_2 必须分割成为与各实体边界相应的几个线段。以实体 D_0-1 为例, 它由 $D_0-1B_1, D_0-1B_2, D_0-1B_3-1, D_0-1B_3-2, D_0-1B_4-1$ 和 D_0-1B_4-2 等 6 条线段组成, 相互间通过 D_0-1 来构成一个整体。同样实体 D_1-0 由 5 条线段围成, 分别是 $D_1-0B_1, D_1-0B_2, D_1-0B_3, D_1-0B_4-1$ 和 D_1-0B_4-2 ; 实体 D_1-1 由 6 条线段围成, 分别是 $D_1-1B_1, D_1-1B_2, D_1-1B_3-1, D_1-1B_3-2, D_1-1B_4-1$ 和 D_1-1B_4-2 。从图中可以看出, D_0-1 与 D_1-0, D_1-1 相邻, D_1-0 与 D_1-1 也相邻, 所以它们之间有共边关系。这些公共边上应该有双重编号, 如 D_0-1 与 D_1-0 公共边的编号为 D_0-1B_3-2, D_1-0B_4-1 ; D_0-1 与 D_1-1 公共边的编号为 D_0-1B_2, D_1-1B_1 ; D_1-0 与 D_1-1 公共边的编号为 D_1-0B_4-2, D_1-1B_3-1 。

以上是二维剖面的编号, 如果有多个剖面, 我们可以将其他剖面同样进行编号, 然后将各实体的各边对应起来, 通过插值生成曲面, 并且对曲面赋予相应边的属性。如果某个曲面是由公共边插值生成的, 此曲面就成为公共曲面, 从而体现了实体间的邻域关系。几个邻接的曲面可以围成一个真三维实体, 而每个小三维实体通过实体的编号联系起来, 可进一

步构成完整的盆地三维构造-地层格架。在图 1 中, 如果将沉积相的边界加进去, 就可以划分出许多更小的实体, 编号原理相同, 只是工作量有些大。这样插值形成的数字地质体, 将是具构造-地层格架的三维数字成因地层或数字层序地层。

2 盆地二维构造-地层剖面的三维化插值原理

常用的插值方法很多, 其中包括线性插值、多项式插值、克里金插值和样条插值等^[7,8], 但各有优缺点。结合地质剖面的特点, 笔者提出了相似变形插值的新方法。将这些插值方法与空间拓扑结构的 B-Rep 模型有机地结合起来, 便可以将二维地质剖面内插成盆地三维构造-地层体。下面结合盆地模拟实际对相似变形插值法作以介绍。

在相邻的地质剖面上, 由于自然发生的相变和变形, 常使地质体出现位置偏移, 上述各种插值方法只能按照外形机械地进行整体对应, 难以具体地表达这种局部偏移现象。相似变形插值法类似于将每条线分解成两条独立的线条, 然后分别进行插值。这就使得在实际应用中, 用户可以根据确定点来控制线条上点的对应状况。如图 2 所示, 假设线条 2 上的点 B 与线条 1 上的 B 是对应点。我们可以通过该点, 把两条线条都分成两段, 然后将线条 1 B 点前后两段与线条 2 B 点前后两段分别进行对应插值。具体插值时可选择上述线性插值、多项式插值和样条函数插值等基本模型中的任一种, 对应点可以选择多个, 数目不限, 十分灵活。例如, 可以强制让线条 1 的峰底与线条 2 上的峰顶对应, 从而控制曲面的形态, 使其符合实际变化。计算公式取决于所选的基本插值模型。

相似变形插值的优点可以让操作人员控制插值过程, 能很方便地根据实际情况来确定不同剖面的



图 2 相似变形插值法应用举例

Fig. 2 Application example of similar deformation interpolation method

对应点,从而使插值所形成的曲面更加符合实际情况.缺点是它取决于所选择的基本插值模型.

3 盆地二维构造-地层剖面三维化插值的实现

3.1 三维化插值方法的实施

设若以线条为插值基元,根据图1中实体各边之间的拓扑关系,可将各有关剖面上的所有实体的边按编号分别对应分组,再在每组中选出线段交点数最多的一条边,并且算出该边上各交点的分布规律,然后将其与该边在其他剖面上的对应边作比较,缺失的对应点均按此分布规律补齐.这样就可以使每组里所有边的点数相同.依次将每组里的边按交点逐个对应插值(插值函数由所选的插值方法决定,两点之间插入点的个数按实际情况确定),再将内插所得的各点加以规则网格处理,便形成了所需的内插曲面.例如,图3表示分别在不同剖面上的一组线条,它们的编号相同,即同属于某个实体的某条边.可以看到,线条1有4个点为A,C,D,E,线条2有4个点为A,B,C,E,线条3有5个点为A,B,C,D,E.根据上面的原理,线条1和线条2必须按线条3上各点的分布规律补上一个点,线条1补在b处,线条2补在d处,然后按点对应插值形成曲面(图3中较细的A线条是插值生成的).如果选择克里金插值方法,那么插值过程将不按照点的对应来计算,而是将处在变程范围内的所有点(当然是同组线条上的点)纳入计算.根据同样的原理,可以将若干对应的线条内插成曲面,再由各曲面内插成实体.

3.2 盆地构造-地层格架三维插值模块

在上述分析和探讨的基础上,作者采用新一代图示语言“IDL”,建立了具有较强功能的盆地构造

-地层格架三维插值模块.下面详细说明如何利用该模块进行剖面插值生成曲面和三维盆地构造-地层格架(图4).

(1)插值基元的选择.插值基元表示用来插值的基本图形单元,即线条和填充多边形.如果选择线条基元来插值,就意味着使用图1中某实体的每个边来与其他剖面上的对应边分别插值.由于相邻的实体可以共有同一个边,因此内插出来的三维体就可共有-一个曲面.这样做既减少了数据量,又可以表达实体之间的共面关系,但编号相对复杂些.如果选择填充多边形基元来插值,则意味着使用图1中的实体(如D0-1等)来与其他剖面上的实体对应插值.这时,相邻的实体的公共面将会重复进行两次插值,不仅增加了数据量,而且这两个本应是相同的公共曲面,可能会由于两个实体的发展趋势不同而导致数据冲突,出现重叠、空隙等现象.如果实体之间都是各自独立的,则用填充多边形基元来插值,实体编码和属性的给定相对简单,勿须细化到各个边.然而,实际上,盆地内部的三维构造-地层实体之间都是相互比邻的,线条基元插值方式是最为常用的.

(2)选择方式的确定.选择方式是指在插值时选择基元的方式.人工选择要求用户用鼠标在图形区一个一个选取图元,即要求用户自己判断谁跟谁对应;而条件选择则根据用户给定的条件自动判断来选择图元,并且自动判断谁跟谁对应.有两种条件:①颜色号的给定.颜色号是用于进行条件选择时给定颜色条件值,可按事先约定给出;②属性值的给



图3 以线条为插值基元的插值方法说明

Fig.3 Illustration of interpolation method using line as basic element



图4 盆地构造-地层格架的插值对话框

Fig.4 Interpolation dialog window of tectonic-stratigraphic framework of basin

定. 进行条件选择时还应当给定属性值条件. 如果为“*”表示选择所有的基元. 在进行属性值条件比较时, 系统判断规则是包含属性值的基元被选择, 而不是等于. 这里, 属性值相当于图 1 中对线条的编号(如 D0-1B1)或实体的编号(如 D0-1).

(3) 插值方法选择. 该对话框可以用来选择插值的数学方法. 本模块内包含的插值方法包括: 线性插值、多项式插值、样条插值、相似变形插值、克里金插值等 5 种. 当用户选择了一种方法后, 对话框中被选中的模型栏将由灰变黑, 用户可以进一步在所列的几种子模型中选择一种. 例如, 当用户选择了克里金插值方法, 对话框中克里金模型栏将由灰变黑, 用户可以在球状和指数两种子模型中再选择一种; 当选择了相似变形插值方法, 对话框中相似模型栏也将由灰变黑, 用户可以在多项式和样条两种子模型中再选择一种.

(4) 两相邻剖面之间插值数. 表示在两条剖面之间插入剖面的个数, 此参数的范围是正整数.

本模块还带有一个用于进行剖面数据的编码和输入的子模块. 当按照前述方法完成了剖面数据的编码和输入之后, 采用本模块的上述对话框, 可以很

方便地实现盆地三维构造-地层格架的模拟. 该模块已经在对珠三凹陷三维构造-地层格架的模拟中取得了成功.

参考文献:

- [1] 吴冲龙, 张洪年, 周江羽. 盆地模拟的系统观与方法论[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(6): 741~747.
- [2] 吴冲龙. 计算机技术与地矿工作信息化[J]. 地学前缘, 1998, 5(1~2): 343~354.
- [3] Li R X. Data structures and application issues in 3-D geographic information systems [J]. Geomatica, 1994, 48(3): 209~224.
- [4] 李清泉, 李德仁. 三维地理信息系统中的数据结构[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(2): 128~133.
- [5] 李德仁, 李清泉. 一种三维 GIS 混合数据结构研究[J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 121~127.
- [6] 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1): 7~15.
- [7] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数字分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986.
- [8] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1984.

INTERPOLATION METHOD FOR ESTABLISHING 3-D TECTONIC-STRATIGRAPHIC BASIN FRAMEWORK

Tian Yiping Yuan Yanbin Li Shaohu Wu Chonglong

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Establishing 3-D tectonic-stratigraphic basin framework is one of the key techniques in the 3-D basin modeling. Effective interpolation and extrapolation methods must be chosen to convert a series of 2-D seismic interpretation profiles into 3-D tectonic-stratigraphic basin framework. However, the selection of interpolation method and realization of spatial analyses depend on the spatial topological structure. In line with the B-Rep model-based 3-D spatial topological basin structure and the corresponding coding graphical principle, several kinds of morphological interpolation methods are introduced in this paper for the reconstruction of 3-D tectonic-stratigraphic basin framework: linear interpolation, polynomial interpolation, Kriging interpolation and spline interpolation. At the same time, the similarity deformation interpolation method is also proposed. All these methods, once successfully applied to the simulation of the 3-D tectonic-stratigraphic basin framework in Zhushan basin, may well support various spatial analyses such as vector shear analysis.

Key words: basin modeling; 3-D modeling; B-Rep model; spatial topological structure; morphological interpolation method; basin stratigraphic framework.