

三维地震建模与可视化

赵 博¹, 孟小红¹, 侯健全²

1. 中国地质大学地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083
2. 北京科胜博达技术有限公司, 北京 100085

摘要: 在地震模型与正演中利用已知资料或虚拟建立复杂的二维和三维地震模型, 对进行后续地震模拟和面元分析及合理地设计观测系统等工作是非常重要的, 同时为地震资料处理解释提供了工具, 为反演方法提供了必要的基础. 根据地震模型特点对地震模型建立及其在计算机上可视化的一些算法进行了简要阐述, 对能很好地实现三维地震模型可视化的克里格插值、Delaunay 三角剖分算法的原理进行了分析研究. 在 SeisWay1.0“地震模型与正演”模块中根据以上算法所生成的模型数据生成三维地震模型.

关键词: 三维地震模型; 地震模型可视化; 剖面建模; 普通克里格; Delaunay 三角剖分; 限定三角剖分.

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2007)04-0549-05

收稿日期: 2007-04-12

Building and Visualization of 3D Seismic Model

ZHAO Bo¹, MENG Xiao-hong¹, HOU Jian-quan²

1. Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Beijing Co-Sail Technology Company Limited, Beijing 100085, China

Abstract: In the seismic model and forward, building complex 2D and 3D seismic models by making use of the known or virtual information is of great importance to the subsequent seismic modeling, binning analysis and rational design of geometry system. It also offers a tool for the interpretation of seismic data processing and provides the necessary infrastructure for inversion methods. This paper briefly describes some algorithms of building the seismic model and computer visualization according to the feature of seismic model. It mainly analyzes the algorithms of building 3D seismic model open in computer visualization, such as Kriging Interpolation and Delaunay Triangulation. According to the model-building data from the above algorithms, 3D seismic model can be built in "seismic model and forward" of SeisWay1.0 by means of blocks section modeling.

Key words: 3D seismic model; visualization of seismic model; section modeling; ordinary Kriging; Delaunay triangulation; conforming triangulation.

20 世纪 80 年代后期, 随着科学计算可视化及计算机图形学的发展, 为地球物理利用勘探资料重构地下三维地质模型创造了条件, 地质信息的三维可视化成为 90 年代地学领域的研究前沿. 地质信息的三维可视化是指以适当的数据结构建立地质特征的数学模型, 采用计算机技术将数学模型以 3D 真实感图像的形式予以表现. 利用三维可视化的结果不仅可以描述复杂的地质构造情况 (孟倩, 2004;

周翠英等, 2005), 给我们以直观逼真的感觉, 而且为地球物理的正演和反演提供模型基础, 最终实现分析地下石油矿产等资源构造形态和属性特征的目的.

随着地球物理勘探技术的不断发展, 地震勘探已经进入高精度、高分辨率勘探阶段, 因此对地球物理模型的要求也越来越高, 在计算机上实现地球物理模型的可视化变得越来越重要. 本文主要对克里格插值和 Delaunay 三角剖分的原理进行了详细分

基金项目: 北京市重点学科“地球探测与信息技术(XK104910598)”资助.

作者简介: 赵博(1976-), 男, 硕士研究生, 从事地球物理软件设计方面的研究工作. E-mail: zb7677@163.com

析研究;并在 Seis Way 1.0“地震模型与正演”模块中是利用工区已有地震资料或在计算机上利用剖面建模(Alan and Norman, 2003)的方法,通过插值、剖分运算后建立初始三维地震模型数据体;最后利用计算机图形学方法实现三维地震模型数据体的可视化,生成三维地震模型。

1 建模所需主要算法

本文研究的三维地震建模不同于传统的层面建模方法,而是利用块状模型来表示实际的模型.要得到几何及拓扑一致三角网格模型,涉及许多算法.其中主要包括:(1)由离散点集插值生成曲面:由有限的控制点内插外延生成延伸到工区边的界面(孟小红和王卫民,2001)。(2)离散点集三角剖分:对离散点进行空间域的三角剖分,尽可能保证三角形是饱满的。(3)带逆断层等复杂地质构造的限定三角剖分,带有内部限定条件点集的三角剖分。(4)层面自适应的三角剖分:根据层面起伏情况,层面变化剧烈的地方用较多的三角形表示,层面变化平缓的地方用较少的三角形表示,以提高计算的效率。(5)层面网格的相交处理:地层与地层或地层与断层相交时,保证三角剖分后相交部位三角形的一致性,达到无缝连结。(6)区块提取算法。

三维地震模型的可视化需要对离散的数据进行插值、剖分后建立数学模型,再从中提取曲线、曲面等几何信息,利用计算机图形学的方法实现可视化.采用不同的插值、剖分方法成像的效果将会不同.例如,反距离插值方法虽然算法简单,但在网格区域内产生围绕观测点位置的“牛眼”现象;传统的规则网格剖分会在曲面上产生锯齿效应等现象,这些现象在三维可视化过程中都是需要避免的情况.本文主要对能很好地实现三维地震模型可视化的普通克里格插值和 Delaunay 三角剖分的方法原理进行分析研究。

1.1 普通克里格插值

克里格方法是对空间数据进行加权插值的权值计算方法,该方法不仅考虑了已知点和待估点的影响,而且用协方差函数来定量的考虑已知点的影响,强调了数据构形的作用,权系数的求取满足无偏性和均方误差最小的衡量标准.克里格法是一种广泛应用于地质统计的网格化方法(潘结南和孟召平,2005),这种方法的一般过程是:计算实验变差函数

→拟合实验变差函数→解方程求加权系数→求出估计值。

普通克里格方程组的建立:设 $Z(x)$ 区域变化量,并且满足二阶平稳假设或本征假设,二阶平稳假设指区域变化量 $Z(x)$ 的数学期望等于常数,方差相同,但实际情况一般只满足本征假设,即区域变化量的增量 $Z(x) - Z(x+h)$,方差不依赖 x ,只与 h 有关。 $Z_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是已知采样点的数据信息, Z_v 是所要求取的点的数据信息, Z_v 的估计量 Z_v^* 为:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i, \tag{1}$$

其中, λ_i 是加权因子, Z_v^* 是 n 个数据的线性组合,克里格方法就是在保证这个估计量是无偏的,且估计方差最小的条件下求出 n 个加权因子,从而求出估计量 Z_v^* ,无偏和估计方差最小条件分别为:

$$\begin{aligned} E[Z_v^* - Z_v] &= 0, \tag{2} \\ \sigma_E^2 &= E[Z_v^* - Z_v]^2 - \{E[Z_v^* - Z_v]\}^2 = \min. \tag{3} \end{aligned}$$

E 是求取期望值的符号,由无偏条件方程(2)得:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1. \tag{4}$$

区域变化量在满足二阶平稳的条件下推导估计方差的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \sigma_E^2 &= E[Z_v^* - Z_v]^2 - \{E[Z_v^* - Z_v]\}^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{i,j} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i,v} + C_{v,v} \end{aligned} \tag{5}$$

其中, $C_{i,j} = E\{[Z_i - E[Z_i]][Z_j - E[Z_j]]^*\}$ 是已知点 i, j 的数据信息 Z_i, Z_j 的协方差,同理 $C_{i,v}$ 是已知点 i 的数据信息 Z_i 和待估点数据信息 Z_v 的协方差, $C_{v,v}$ 是待估点数据信息 Z_v 的自协方差.在进行插值运算的时候,用实验变差函数拟合的模型上相应的值来代替这些协方差。

估计方差 σ_E^2 对 λ_i 求偏导数为 $\frac{\partial \sigma_E^2}{\partial \lambda_i} = 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{i,j} - 2C_{i,v}$,为了使估计方差最小,利用拉格朗日乘子法求极值问题,令:

$$F = \sigma_E^2 - 2\mu \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right], \tag{6}$$

这里 F 是 n 个权系数 λ_i 和 μ 的 $n+1$ 元函数,求出 F 对 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 μ 的偏导数,并令其为零,并且考虑到半变差函数和协方差函数的关系式 $C(h) = C(0) - \gamma(h)$,得到如下的克里格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{i,j} + u = \gamma_{i,v} & (i = 1, 2, \dots, n), \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1. \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ 为拉格朗日算子, $\gamma_{i,j}$ 是点 i, j 的数据信息, Z_i, Z_j 的半变差函数, $\gamma_{i,j}$ 是球状模型或者线性模型.

通过方程组(7)求出 λ_i , 再代入到方程(1)中, 从而求出估计量 Z_v^* .

1.2 Delaunay 三角剖分

三角剖分是代数拓扑学里最基本的研究方法, 能使曲面很好地在计算机上成像. 在地球物理建模过程中, 由于地质构造极为复杂, 存在着断层、逆断层、断层的自动撕裂等问题, 所以利用 Delaunay (限定 Delaunay) 三角剖分网格技术能很好地使地球物理模型可视化, 在模型边缘或断层处不会产生锯齿效应(杨钦, 2005). 在 SeisWay1.0“地震模型与正演”模块中三维地震模型曲面的成像过程中主要是利用了 2.5 维 Delaunay 三角剖分, 首先我们阐述 Delaunay 三角剖分的主要原理.

Delaunay 三角形的定义应从 Dirichelet 多边形说起. 在每个网格点附近划出一个邻域, 邻域内的任一个点到该网格点的距离小于到其他网格点的距离. 这个邻域多边形叫做 Dirichelet 多边形. 将每个多边形内的网格点与相邻的多边形的网格点连接起来, 构成一个三角形(图 1), 称为 Delaunay 三角形. Delaunay 三角形具有一种性质, 它可以尽可能地避免形成过瘦的三角形, 即使所形成的所有三角形最小内角和最大, 也称为“空圆盘”的性质: 对于任意 Delaunay 三角形, 其外接圆的内部区域不含其他的点.

Delaunay 三角剖分的经典算法主要有空洞法

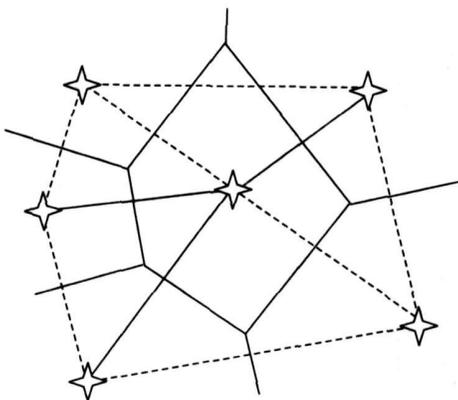


图 1 Dirichelet 多边形

Fig. 1 Polygon of Dirichelet

和局部变换法(杨钦, 2005), 在地震模型网格剖分中主要采用以 Bowyer-Watson 算法为代表的空洞加点法. 其具体算法实现过程如下: (1) 遍历所有采样点、插值点, 得到包容所有点的初始三角形, 并放入三角形链表. (2) 将点集中的散点依次插入, 在三角形链表中找出其外接圆包含插入点的三角形(称为该点的影响三角形), 删除影响三角形的公共边, 将插入点同影响三角形的全部顶点连接起来, 完成一个点在 Delaunay 三角形链表中的插入. (3) 根据断层或逆断层等地质条件和边界条件对形成的三角形进行约束, 然后将形成的三角形放入 Delaunay 三角形链表. (4) 循环执行上述第 2 步, 直到所有离散点插入完毕.

上述基于离散点的构网算法理论严密、唯一性好, 网格满足空圆特性. 在完成构网后, 增加新点时, 无需对所有的点重新构网, 只需对影响三角形范围的新点进行局部联网, 且局部联网的方法简单易行. 同样, 点的删除、移动也可快速动态地进行, 但此算法的运行效率不是很高, 有待进一步改进.

2 模型可视化过程

SeisWay1.0“地震模型与正演”模块是根据以上算法, 并借助 OPEN GL 工具在计算机上实现地震模型的可视化, 模块中利用剖面建模的方法来生成模型. 根据用户输入数据(二维剖面图、层面构造等值线数据等), 通过插值、剖分算法运算后, 以及用户的交互编辑, 生成地层面、断层面, 建立带全局或局部正、逆断层, 尖灭, 侵入体和透镜体等的三维地震模型.

2.1 剖面建模

剖面建模流程如图 2 所示.

2.2 设置模型参数和输入测线位置

根据实际要处理的地质模型数据新建模型, 建好模型后, 所有的地质层面的建立必须在此模型内, 所有的三维显示必须以此模型为基础. 所输入的参数有 X, Y, Z 方向的范围值, 初始水平地表 Z 值, 以及选择所需的长度单位.

在正确输入模型参数后生成立体模型窗口, 对该模型窗口可以进行放大、缩小、旋转、平移等变换操作, 可以设置光照、地层颜色, 根据实际数据的范围可以对模型的范围进行重新定义或根据数值范围进行自动提取范围.

输入测线位置如图 3 所示。

2.3 地层、断层编辑

选择测线进入剖面地层线编辑窗口, 然后进行

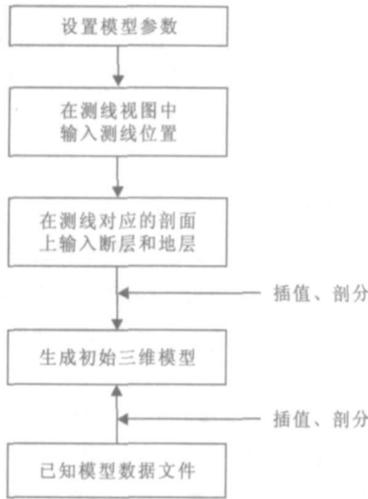


图 2 剖面建模流程

Fig. 2 The flow of section modeling

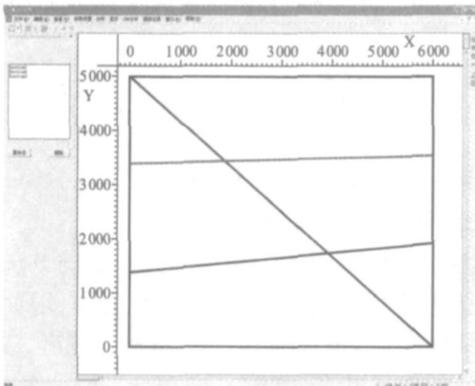


图 3 输入测线

Fig. 3 Input section line

地层编辑。地层线编辑窗口, 如图 4 所示(测线 Section1 上的地层 Horizon1、Horizon2、Horizon3、Fault1), 在测线 Section2 上输入的地层和断层与测线 Section1 相似。

2.4 三维模型生成

当所有剖面数据输入完成后, 通过数据插值、剖分算法运算以及地层相交线的处理、边界处理后生成三维层面数据体, 然后对数据体进行显示, 生成三维地震模型(图 5、6)。

3 结论

本文主要对三维地震建模过程中的克里格插值、Delaunay 三角剖分算法原理进行了研究, 并利用剖面建模的方法在 SeisWay1. 0“地震模型与正演”模块上实现三维地震模型的可视化, 充分把物探数值方法与计算机图形学相结合, 为后续的正演和

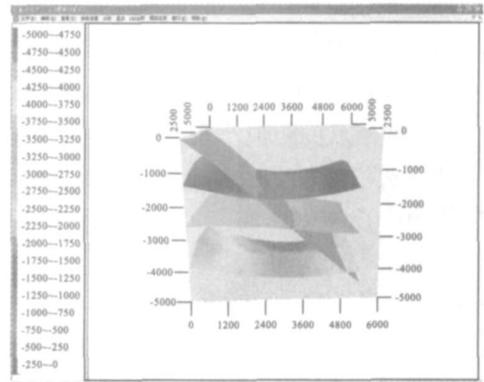


图 5 生成三维地震模型

Fig. 5 Building 3D seismic model

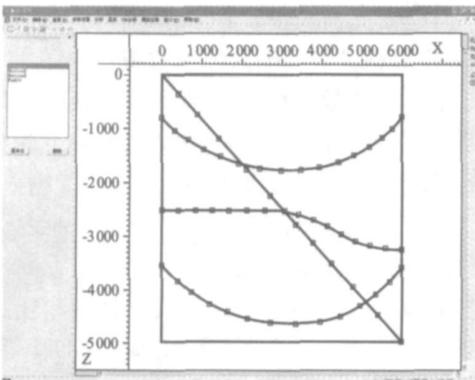


图 4 输入地层线、断层线

Fig. 4 Input stratum and fault line

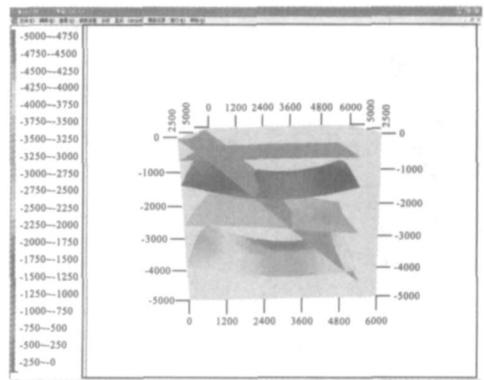


图 6 生成插入水平层的三维地震模型

Fig. 6 Building 3D seismic model inserted horizontal stratum

反演工作提供了优秀的三维地震模型。

当然, 由于地震模型可视化的复杂性, 本文所讨论的建模算法还存在一些需要继续研究的问题, 如: 为了提高程序运行效率的自适应 Delaunay 三角剖分, 根据层面起伏情况, 层面变化剧烈的地方用较多的三角形表示, 层面变化平缓的地方用较少的三角形表示; 处理地层与地层或地层与断层相交时, 保证三角剖分后相交部位三角形的一致性, 避免生成的复杂模型在相交处出现缝隙。

References

- Alan, M. L., Norman, L. J., 2003. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers & Geosciences*, 29(3): 547—555.
- Meng, Q., 2004. Realization and optimization of Delaunay gridding algorithm in seismic model gridding. *Journal of Jiamusi University*, 22(3): 323—327 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. H., Wang W. M., 2001. The principle and application of computer aided design for geological model. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Pan, J. N., Meng Z. P., 2005. Study on 3D geoscience modeling and visualization of mines. *Coal Geology & Explo-*

ration, 33(1): 16—18 (in Chinese with English abstract).

- Yang Q., 2005. The technology of conforming Delaunay triangulation mesh generation. Electronics Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, C. Y., Liu Z. Q., Dong, L. G., 2005. Grid cutting method of 3D stratum and its application to engineering. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 377—386 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 孟倩, 2004. 地质模型网格剖分中 Delaunay 三角剖分算法的实现及优化. 佳木斯大学学报, 22(3): 323—327.
- 孟小红, 王卫民, 2001. 地质模型计算机辅助设计原理与应用. 北京: 地质出版社.
- 潘结南, 孟召平, 2005. 矿山三维地质建模与可视化研究. 煤田地质与勘探, 33(1): 16—18.
- 杨钦, 2005. 限定 Delaunay 三角网格剖分技术. 北京: 电子工业出版社.
- 周翠英, 刘祚秋, 董立国, 2005. 三维地层网格剖分方法与应用. 地球科学——中国地质大学学报, 30(3): 377—386.