张峰. 基于广义三棱柱和 Kriging 插值的三维地层建模[J]. 灾害学，2018，33(S1)：30 - 33. [ZHANG Feng，YANG Junhai. Three Dimensional Stratigraphic Modeling Study Based on Generalized Tri Prism and Kriging Interpolation Method[J]. Journal of Catastrophology，2018，33(S1)：30 - 33. doi：10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2018. Z1. 006.]

基于广义三棱柱和 Kriging 插值的三维地层建模*

张 峰，杨军海

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司，陕西 西安 710075)

摘 要：总结分析目前三维地层建模技术存在的问题，针对其不足之处，研究广义三棱柱建模原理和 Kriging 空间插值方法原理，结合地质构造和地层层序特点，提出了基于广义三棱柱体元为基本单元；融合物探、化探、地调资料以及工程地质人员对研究区域的综合分析结果而产生的经验钻孔；并以地形等高线建立不规则三角网(TIN)，利用 Kriging 空间插值方法，选择合适的变异函数，进行地层属性内插，增加虚拟插值钻孔。最后应用广义三棱柱建模方法，使用以上三类钻孔数据建立相对准确的三维地层模型。

关键词：三维；地层建模；三棱柱；克里格；变差函数

中图分类号：X43；P642　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000 - 811X(2018)S1 - 0030 - 04

doi：10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2018. Z1. 006

三维地质建模(3D Geoscience Model - ling)是运用计算机语言，对地质资料进行地学统计、地质解译、空间分析预测以及三维可视化的地质分析技术。目前，国内外已经在这个方面做了大量的研究与实践，总体归纳为多层 DEM 法、四面体格网法、三棱柱法。多层 DEM 建模其特点是可以建立精确的地层表面模型，数据量小、建模速度快，但其缺点是缺少地层内部信息，无法进行空间分析；四面体格网建模其特点是数据量庞大、算法复杂，不适合大面积地质三维建模；三棱柱建模是使用实际钻孔数据进行地层建模，数据量较少、建模速度快。以上三种方法都存在一定问题，主要问题总结为两个方面：①没有将钻孔数据以外的等高线、物探、化探、地调资料以及工程地质人员对研究区域的综合分析结果融入到建模过程中，只使用少量的实际钻孔数据建模，模型的质量难以保证；②在未知区域没有进行空间内插，建立的模型缺少地质结构上的渐变和相关性[1-3]。

本文针对以上两个方面的不足，拟采用广义三棱柱体作为基本模型单元，在实际钻孔的基础上，融合物探、化探、地调资料以及工程地质人员对研究区域的综合分析结果，并以等高线数据建立的地形不规则三角网(TIN)和 Kriging 空间插值方法进行地层属性内插。最后使用三类钻孔数据建立三维地层模型。

1 建模原理与分析

1.1 广义三棱柱建模原理

广义三棱柱可以用来表示地层的最小三维空间单元，由上、下两个不一定平行的三角形和侧面三个四边形组成。用广义三棱柱集合表示地层时，上、下两个面的三角形集合表示地层的表面，周围三个四边形用于同一层相邻三棱柱之间的相互连接。三棱柱某一条棱边退化以后就变成了三棱锥、两条棱边退化以后就变成四棱锥。三棱锥和四棱锥可以用来处理地层尖灭、透镜体、分叉等复杂的地质构造[4-5]。如图 1 所示。

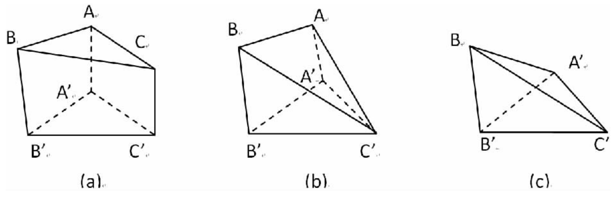

图 1 广义三棱柱体元

1.2 Kriging 插值方法原理

地质统计学是以区域化变量为基础，借助变

* 收稿日期：2018 - 03 - 05　　修回日期：2018 - 07 - 10
第一作者简介：张 峰(1981)，男，陕西礼泉人，硕士研究生，研究方向为 GIS 和 BIM 技术在公路工程中的研发与应用.
E-mail：zfgis@qq.com

异函数，研究既具有随机性又具有结构性，或空间相关性和依赖性等自然现象的一门科学。其中最主要的方法就是 Kriging 插值方法，它是考虑了样品的形状、大小、品位以及待插点所在区域的因子空间位置关系的最优线性无偏最小方差的插值方法。假设研究区域 A，区域化变量为$\{Z(x)\in A\}$，x 表示空间位置(一维、二维或三维坐标)，$Z(x)$在采样点 x_i(1，2，…，n)处属性值为 $Z(x_i)$，则待插点 $x_0\in A$ 处的属性值 $Z(x_0)$的 Kriging 插值结果 $Z(x_0)$是已知采样点属性值 $Z(x_i)$(1，2，…，n)的加权和[6]，即：

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i), \lambda_i(i = 1,2,\cdots,n)。\tag{1}$$

依据无偏性的要求，$\lambda_i(i=1，2，\cdots n)$满足关系式

$$\sum_{i=1}^{n}\lambda_i = 1。\tag{2}$$

在无偏条件下使估计方差达到最小，可得求解权系数 $\lambda_i(i=1，2，\cdots n)$的方程组：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i \mathrm{Cov}(x_i,x_j) - \mu = \mathrm{Cov}(x_0,x_j); \\ \sum_{i=1}^{n}\lambda_i = 1;\end{cases} \quad (j = 1,2,\cdots n)。\tag{3}$$

将上面的方程组用变异函数表示：

$$\gamma(X_1，X_2) = \frac{1}{2}E\{[Z(X_1) - Z(X_2)]^2\}。\tag{4}$$

1.3　地层层序划分原理

本文中地层层序的概念与地质意义上的概念有着本质区别，为了地层建模方便，地层层序要求所有地层贯穿于研究地区，且自上而下的排序，一个有序完整的层序使用于每一个钻孔，但一个统一的地层层序似乎不太可能出现在每个钻孔中，地层常常尖灭或是局部呈透镜体，而且某一层可能呈现不连续状态。所以就要通过地层层序来表达这些常见的地质现象。如图2 所示，包括粘土、土层、沙砾3个地层，在其左边和右边钻孔就不会探测到地层中部的透镜体地层。在建模过程中通过将每一层均作为完整的沉积岩层来解决透镜体结构的地层，通过调节尖灭地层的厚度为上层土的方法产生地层结构。从而在建模时将地层分为四层(上层土、粘土、下层土、沙砾)[1]，如图3 所示。

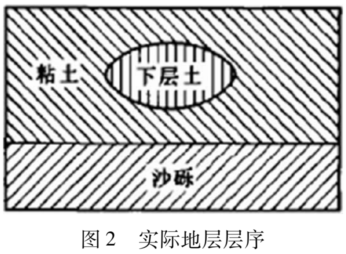

图2　实际地层层序

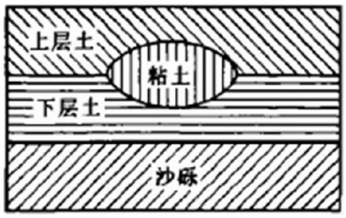

图3　本文的地层层序

地层层序划分是地质工程人员根据已有的钻孔、地调、物探、化探资料以及经验推断出地层的空间分布情况。其步骤如下：

(1)确定研究区域总的地层数，根据钻孔通过的最大岩土层数综合分析获得。

(2)根据钻孔所遇到的岩土层在垂直方向上的关系确定地层的排列顺序以及确定层与层的上下关系。

2　三维地层建模

2.1　数据处理

数据处理包括钻孔数据的统一编排和增加经验钻孔两部分。钻孔数据的统一编排是在上面地层划分结果的基础上，将钻孔的编号、孔口坐标、地层厚度，依此录入到钻孔数据库中，其中钻孔地层的顺序要完全和上面地层划分结果一致，对于钻孔中缺失的某一地层，可以将该层的厚度值设为零，建模过程中将会自动处理，将所有编排完成的钻孔集合记为 A。

钻孔资料是地层建模中非常重要的数据，但由于钻孔成本高，有些地点无法打钻等因素影响。研究区域中的钻孔数目非常有限，并且空间分布上不规则，有的地段钻孔数相对稠密，有的地段又非常稀少。而除了钻孔资料以外，通常主要的地质资料还包括物探资料、化探资料、地调资料以及工程地质人员根据经验对研究区域的地层结构做出的一些推断。因此，在地质建模中将这些非钻孔数据转换成钻孔形式的数据非常重要，本文将这些转换的钻孔集合称为经验钻孔，记做 B，在建模过程中它们的作用和钻孔集合 A 完全相等。

2.2　地形建模的研究

地形不规则三角网(TIN)是广义三棱柱建模的基础，建立符合实际地形模型的三角网是地层建模一个非常重要的方面。目前基于三棱柱的地层建模，往往是直接使用钻孔的孔口坐标点集构建地形不规则三角网(TIN)，由于地质钻孔数量少的原因，构建的三角网和实际的地形有很大的出入，因此有很大的局限性。而地质资料中的等高线却往往被忽视，没有发挥它的作用。

等高线作为重要的地质资料，在地层建模中的重要性主要表现在两个方面，一方面，根据等高线建立的地形不规则三角网(TIN)精度高，完全可以模拟实际地形；另一方面，地形和地层结构有着密切的联系，使用知识推理将地形数据引入

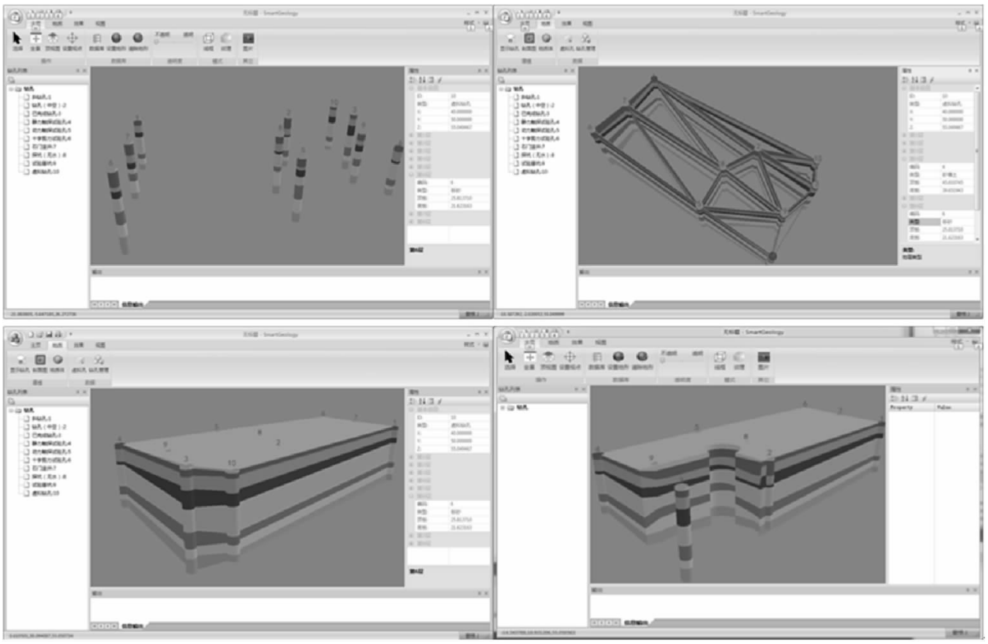

图4 地质模型

到地层建模中，可以建立更为符合实际的地层模型。

首先使用等高线建立地形不规则三角网(TIN)，在三角网中的所有节点标记为地面点，其集合用 P1 表示，然后将钻孔(AUB)孔口坐标点作为约束点依此加入到建立的三角网(TIN)中，并将这些约束点标记为钻孔点，其集合用 P2 表示。

2.3 地层厚度的 Kriging 插值算法研究

上面建立好的地形不规则三角网(TIN)的节点包括两类，地面点集(P1)和钻孔点集(P2)，其中 P2 中的每一个点都有对应的钻孔(AUB)数据，而 P1 没有与之对应的钻孔数据。在此，我们假设 P1 中的每一个点也对应一个虚拟钻孔，并将这个虚拟钻孔集记为 C。下面将使用 Kriging 方法插值出这些虚拟钻孔的地层厚度。其变异函数可以表示如下：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h}\sum_{i=1}^{N_h}\left[Z(X_i + h) - Z(X_i)\right]^2 。 \tag{5}$$

式中：$Z(x_i + h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别表示点 $x_i + h$ 和 x_i($i = 1, 2, \cdots n$) 上的观测数据，h 为观测数据的分离距离，N_h 为在($x_i + h$, x_i)之间用来计算样本的变异函数的样本数。

变异函数理论模型参数拟合就是利用原始采样点数据或者实验变异函数取值对所选定的理论模型参数以待定的方法进行估计。拟合方法一般采用手工拟合，它是一种人机交互的方法，专业人员可以根据经验和分析资料进行参数调整。因此，本文采用手工拟合，一方面通过观察实验变异函数图；另一方面对所研究的区域化变量进行必要的分析，采用人工观察来确定变异函数模型参数，并对参数反复进行交叉验证，最终确定模型参数。其拟合的大致过程如下[7][8]：

(1)对研究区域化变量进行分析，由于地质结构具有空间相关性随距离增大而减小，在大于一定距离后空间相关性为零的特点，本文选用球状模型的变异函数，其中：变程为 a、拱高为 C、块金常数为 C_0。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, h = 0; \\ C_0 + C\left(\dfrac{3h}{2a} - \dfrac{h^3}{2a^3}\right), h \in (0, a); \\ C_0 + C, h < a。 \end{cases} \tag{6}$$

(2)利用实验变异函数散点图确定变异函数参数中的块金常数 C_0、变程 a、拱高 C 等，本文采用最小二乘法求出以上变量。

(3)对各个变量进行交叉验证，本文交叉验证的标准采用偏差平方和最小。

根据 1～3 步骤里求出的变量，通过对每一个虚拟钻孔中的每一层地层厚度进行预测，以该虚拟钻孔为参照，在变程范围内搜索所有相关的钻孔数据集。，带入 $Z(x_0)$ 表达式即可求得虚拟钻孔某层的地层厚度。计算完成后，虚拟插值钻孔集 C 里的所有钻孔也有相应的地层厚度数据。

2.4 三维地层模型的研究

基于上述方法地形不规则三角网(TIN)中的所有地面点集(P1)和钻孔点集(P2)都有对应的钻孔数据，下面就可以使用广义三棱柱进行地层建模。其步骤大致如下：

(1)从地形三角网(TIN)中提取一个三角形，将这个三角形设置为第一层地层三棱柱的上三角形。

(2)按照三角形顶点的钻孔编号，提取出对应的三个钻孔数据，以第一层地层的厚度值为参数

连接第一层地层三棱柱的下三角形；上下三角形对应顶点相连形成侧面四边形。

(3)依此类推，连接这三个钻孔通过的所有地层对应的三棱柱，然后将三棱柱叠加在一起，形成相应的局部完整地层。

(4)重复 1 ~3 步骤，直到地形三角网(TIN)中的三角形遍历完为止，至此，三维地层模型建立完成。

2.5　平台开发

根据上述建模方法，利用 Visual C + +语言和 OpenSceneGraph 图形引擎进行编程[9]，开发出三维地层建模程序。以某小区的地质数据为研究对象，研究区内共有实际钻孔 7 个，经过物探、化探、地调资料结合专业地质人员的经验，对研究区域综合分析，增加 2 个经验孔，全区总共有 9 个钻孔，然后根据等高线建立地形三角网(TIN)，进行 Kriging 插值，经过实际验证，建立的三维地层模型可以准确的反映研究区域的地层分布情况。地质模型如图 4 所示。

3　结语

本文在利用实际钻孔数据的同时，充分挖掘地质调查中钻探、物探、化探、地调资料以及工程地质人员对研究区域的综合分析结果，增加经验钻孔数据；然后以地形等高线数据建立地形不规则三角网(TIN)，结合地质构造的随机性、结构性、空间相关性等特点和地层层序划分，使用 Kriging 空间插值方法，选择合适的变异函数进行地层属性内插。最后以广义三棱柱为基本单元，使用实际钻孔、经验钻孔和虚拟插值钻孔建立三维地层模型。该方法弥补了使用单一钻孔数据建立三维地层模型的缺点，一定程度上确保地层模型的准确性，但是实际工程中经常出现各种复杂地质状况，下一步工作的重点需要对本文的方法进行更多的实际工程验证和优化，来适应更加复杂的地质情况。

参考文献：

[1]　雷赟，孔金玲，张峰. 基于 EVS Pro 的 3D 地质建模[J]. 地球科学与环境学报，2008，30(1)：107 -109.

[2]　孔金玲. 水文地质空间信息系统研究[D]. 西安：长安大学，2004：5 -6.

[3]　罗云烈，王常明，王天佐. 基于 ArcGIS 的地层三维可视化方法[J]. 中国水运，2015，15(7)：91 -93.

[4]　张宝一，吴湘滨，王丽芳等. 三维地质建模及应用实例[J]. 地质找矿论丛，2013，28(3)：344 -346.

[5]　辛梓瑞. 基于 VTK 的广义三棱柱法三维地质建模及可视化研究[D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2013：6 -8.

[6]　李晓军，胡金虎. 基于 Kriging 方法的煤层厚度估计及三维煤层建模[J]. 煤炭学报，2008，33(7)：765 -766.

[7]　李晓军，张振远. 基于指示和普通克里金的不连续地层厚度估计方法[J]. 岩土力学，2014，35(10)：2881 -2883.

[8]　孙强，薛雷，王媛媛. 克里金参数估值法及其在参数估计分析中的应用[J]. 岩土力学，2009，30(S2)：371 -373.

[9]　The Open Scene Graph Project Website[EB/OL]. [2017 -07 -07]. http：//www.openscenegraph.org/index.php.

Three Dimensional Stratigraphic Modeling Study Based on Generalized Tri Prism and Kriging Interpolation Method

Zhang Feng and Yang Junhai

(*CCCC First Highway Consultants Co.*, *LTD.* *Xi'an* 710075, *China*)

Abstract：To summarize and analyze the existing problems of three-dimensional formation modeling technology, in view of its shortcomings, the principle of generalized three prism modeling and the principle of Kriging spatial interpolation method are studied. Based on the characteristics of geological structure and stratigraphic sequence, a basic single element is proposed based on the generalized three prism body element, and the data of geophysical exploration, geochemical exploration and geo modulation are fused. And the experienced boreholes produced by the engineering geological personnel on the comprehensive analysis results of the study area; and the irregular triangular net (TIN) is set up with the topographic contour line, and the Kriging spatial interpolation method is used to select the appropriate variation function to interpolate the stratigraphic attributes and increase the virtual interpolation drilling hole. Finally, a generalized three prism modeling method is used to build a relatively accurate three-dimensional stratum model using the above three types of borehole data.

Key words：three dimensional；stratum modeling；three prism；Craig；variogram