

西岔金矿三维空间普通克里格法的可视化储量计算

张新宇¹, 肖克炎², 陈学工³, 刘光胜¹

(1. 吉林大学 综合信息矿产预测研究所, 吉林 长春, 130026;

2. 中国地质科学院 资源所, 北京, 100037;

3. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 应用计算机图形学方法在 VC. net 环境下利用 Open GL 图形库函数开发了普通克里格法的可视化储量计算模块, 对矿体进行可视化建模和储量计算; 以西岔金矿为例提出西岔金矿区的普通克里格法可视化计算流程, 采用人机交互的形式智能编辑剖面, 动态地圈定矿体, 将生成的矿体细分为晶胞, 并与克里格计算所划分的三维网格体一一对应, 实现了西岔金矿的普通克里格法计算可视化, 并直观、形象、准确地计算出把西岔金矿矿体每一个晶胞的品位、储量和金属含量。

关键词: 克里格; 变差函数; Open GL; 三维可视化

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2006)01-0145-05

Visualized Kriging computation of 3-dimensional mineral reserve in Xicha Gold Mine

ZHANG Xin-yu¹, XIAO Ke-yan², CHEN Xue-gong³, LIU Guang-sheng¹

(1. Institute of Mineral Resources Prediction with Synthetic Information, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Institute of Resources, Academic of Geological Science of China, BeiJing 100037, China;

3. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The module of visualized reserve computation with the method of ordinary Kriging was developed in the development environment of VC. net and by means of Open GL graphic function. The visualized model was built and the reverse of mineral body was worked out through this module. The visualized computation flow of ordinary Kriging was put forward. By using man-machine conversation the profiles were edited intelligently, and mineral body was located dynamically and produced automatically. By means of dividing mineral body into some cells corresponding to the 3D special grids in ordinary Kriging, the grades, reverses, and the metal values of each cell are obtained directly and correctly.

Key words: Kriging; variogram; open GL; 3-dimensional visualization

自 20 世纪 80 年代以来, 地质统计学技术日趋成熟, 利用计算机进行数值计算大大提高了储量估算的精度和效率。但这种计算是一种纯数值计算, 对用户来说是一种近似“暗箱”方式, 很难直观、形象和可控地计算。而科学计算可视化以“可视”的

方式计算和显示各种抽象概念和数学模型, 有效地帮助地质工作者进行分析和推理, 将数字信息转换成易于理解、可进行交互分析的图形方式。为了适于矿山、地质和岩土工程应用, 国外开发了多种三维地质模拟与可视化软件(3DGM Software, 简称

收稿日期: 2005-06-10

作者简介: 张新宇(1978-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 从事应用数学、三维 GIS 空间可视化计算等研究

论文联系人: 张新宇, 男, 博士研究生; 电话: 0431-8503262(0); E-mail: zhang.xinyu@sohu.com

为“3DGMs”)^[1-3]。当前,国际上有几款较成熟的针对地质建模的软件,其中,VULCAN 软件是针对勘探的三维 GIS 软件,包括克里格方法的可视化计算。但我国针对地质统计学的可视化计算还处于起步阶段,有些可视化建模模块的实现是基于 AUTOCAD 平台的,没有自主知识产权。在此,作者在 VC++ .net 环境下,利用 Open GL 图形库函数开发克里格方法的可视化计算模块,在克里格算法上以矩阵分析为工具,以提高计算速度。

1 三维地质体可视化建模的基本原理

1.1 科学计算可视化

科学计算可视化 (Visualization in scientific computing) 指运用计算机图形图像处理技术,将复杂的科学现象、自然景观以及十分抽象的概念图形化,以便理解现象、发现规律和传播知识。利用可视化方法有利于形象地、有联系地看到大量测量结果、数值计算、实验数据等,从而有效地进行处理、分析和推理。例如地质工作者可以通过可视化方法重建地下目标的结构,描述资源分布的状态,模拟煤层、油气开发期间各种参数的动态变化趋势,分析地质现象的几何形态和分布等。

1.2 地质体三维可视化

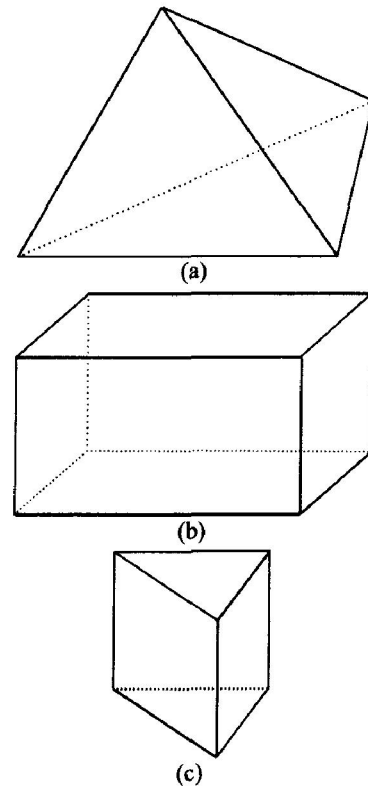
地质体三维可视化研究是当前地质学中具有挑战性的前沿课题之一。张菊明等建立了多种空间曲面拟合函数来模拟三维地质曲面^[4,5],并将其应用于三峡船闸边坡工程地质信息的三维可视化^[5];毛善军等提出利用网格插值法建立地质信息的三维网格化模型^[6];柴贺军等利用有限个测量点对地质结构面进行三维扩展^[7];张煜等则引入三棱柱体元进行三维地层建模^[8]。

三维地质体可视化主要研究的 2 个方面是地质体外部几何形态和内部属性特征。因此,对地质体的可视化建模主要分 2 步:地质体外壳建模和内部空间数据建模。而地质体三维建模是进行可视化研究的前提和基础,模型能否有效地模拟实际地质体,是可视化研究工作的难点。

1.3 三维地质体可视化建模方法

三维地质体建模方法有很多种,目前使用的方法主要可分为表面建模和实体建模两大类^[9-11]。三维空间地质体表面形态各异,根据它的表面形态特征可以分为单值曲面和多值曲面 2 种。地质体表面建模属于多值曲面的模拟范畴,其建模的方法主要

有:直接法,即通过将表面人为地划分为若干单值曲面,分别对每一单值曲面进行表面建模,然后将所得的多个单值曲面缝合;间接法,即对地质体直接进行剖分后再剥离其外表面;基于地质体轮廓线的表面建模法,即在剖面线上对地质体进行分析,圈定地质体的边界线,通过对轮廓线的连接达到对地质体的整体认识,也就是对外轮廓线地质体表面的重构。



(a) 四面体; (b) 六面体; (c) 三棱柱

图 1 3 种地质体几何模型

Fig. 1 The geometric model of three kinds of geological body

实体建模分为体几何模拟和对体内部空间数据的模拟。体的几何模拟方法很多,主要有四面体剖分、五面体剖分、六面体剖分和三棱柱剖分等,如图 1 所示。对体内部空间数据的模拟是对有限且离散分布的勘探工程数据进行空间插值,其关键是选择合适的插值方法。最常用的方法有距离反比法、地质统计学法和分形几何法。

2 三维普通克里格法可视化计算实现

基于地质体轮廓线的表面建模法,采用遗传算法^[12-15]生成两轮廓线间的三角面片,根据实际需要拟定三维普通克里格法可视化计算步骤,见图 2。

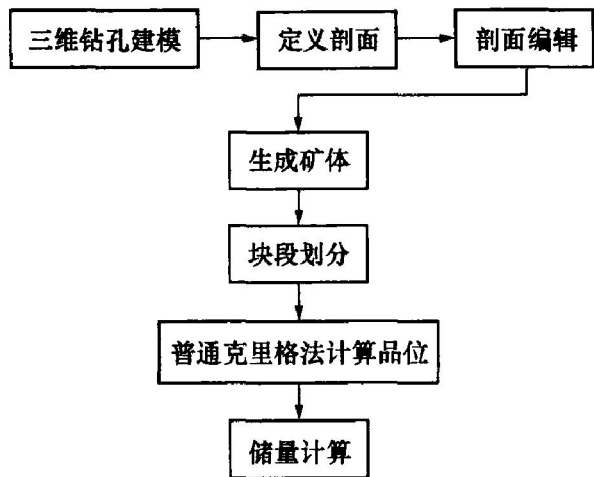


图 2 三维普通克里格法可视化计算步骤

Fig. 2 The procedure of 3D ordinary Kriging in visual computing

2.1 三维地质体建模

2.1.1 三维钻孔建模

系统从 3 个方面的原始资料建立三维模型, 主要是建立矿区的钻孔三维模型^[9]: 一是钻孔的空间总体位置信息, 即钻孔的测量数据, 包括钻孔在三维空间的起点坐标(X, Y, Z)以及钻孔的长度, 见表 1; 二是钻孔在空间的位置变化信息, 即钻孔在空间的倾斜方向和倾角, 这 2 个关于钻孔空间位置信息的资料描述了钻孔在空间的形态, 见表 2; 三是对钻孔的操作及有关的地质描述, 即采样信息, 包括采样位置、样品编号、样品长度、岩性代号, 见表 3。最后由二维的采样信息表、钻孔位置表和钻孔形态表 3 个钻孔数据表, 经过投影变换和坐标变换生成三维钻孔立体图, 见图 3。

2.1.2 定义剖面

根据钻孔建模生成的钻孔数据划分钻孔边界, 定义剖面步长和剖面宽度并生成剖面。

表 1 钻孔位置表示例

Table 1 The example of the position of the hole

钻孔编号	勘探线号	X/m	Y/m	Z/m	总长度/m
zk90	43	4 582 770	42 483 367	496.55	280.41
zk64	43	4 582 698	42 483 447	523.44	346.35

表 2 钻孔形态表示例

Table 2 The example of the hole form

钻孔编号	孔段直径/m	X 轴夹角/(°)	Z 轴夹角/(°)
zk80	0	143	193
zk80	153	135	194

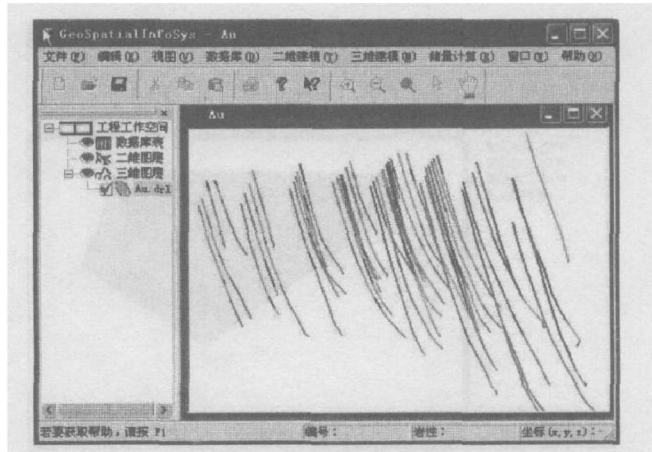


图 3 三维钻孔立体图

Fig. 3 The picture of 3D section edit

表 3 采样信息表示例

Table 3 The example of sample information

钻孔编号	孔段起始长度/m	孔段终止长度/m	样品编号	岩性	w(Au)/(g·t ⁻¹)
zk90	0	373	0		
zk90	37	102.89	3	沉积岩	
zk90	102.89	103.89	3P1-2738	凝灰岩	0
zk90	103.89	104.89	3P1-2739	凝灰岩	0.10
zk90	104.89	105.94	3P1-2740	凝灰岩	0.38

2.1.3 剖面编辑

打开定义好的三维钻孔剖面, 使用各种图形工具动态地圈定矿体、地层和断面, 见图 4。通过这种人机交互的方式可以更准确、直观地显示出矿体剖面的形状, 使克里格计算结果更精确。

2.1.4 矿体的生成

由编辑好的剖面自动生成三维矿体。经光照模型、裁剪处理等计算机图形学算法将三维地质体逼真地显示出来, 见图 5。

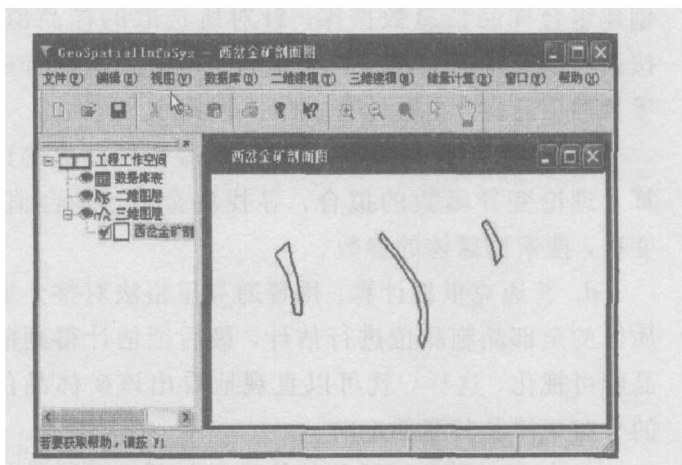


图 4 剖面编辑立体图

Fig. 4 The picture of 3D drill

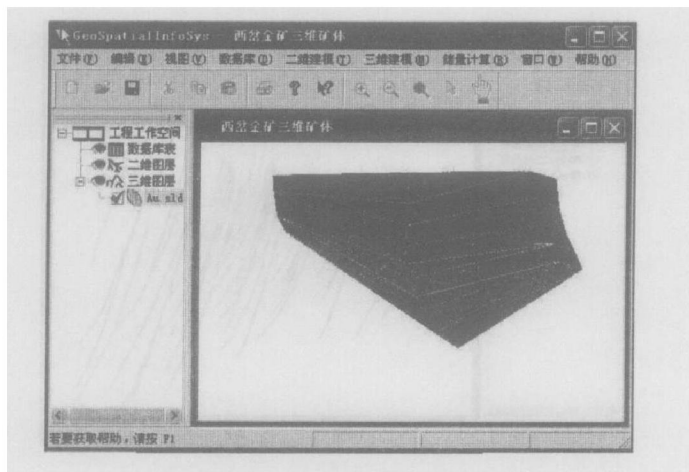


图 5 矿体立体图

Fig. 5 The picture of 3D mine

2.2 三维地质体的块段划分

为了准确地计算不规则地质体的体积,把地质体用一定规则的晶胞结构表达。这里晶胞结构模型是表达矿石品位的地质实体,是在三维空间中连续变化的属性体,它们用固定形状(可自定义,如立方体)的晶胞规则地分布于空间网格节点位置处表示,即地质实体为这些具有空间邻接关系的晶胞单元的集合。而用普通克里格法计算储量时也是把地质实体划分为规则的晶胞单元,这样,把三维建模生成的晶胞与克里格划分的晶胞一一对应起来,就能准确地估计空间地质体的储量。

2.3 三维地质体的普通克里格计算

三维地质体的普通克里格计算步骤如下(见图 6):

a. 数据分析。主要是通过频率分布图、散点图、位置图等对数据的统计分布特征初步考察,发现特异值并对其进行处理。

b. 标准间距的样品组合。进行样品的归一化,创建组合样品信息数据库。针对所选取的样品值,按指定的长度对其进行样长加权平均,将其组合成等长的信息样。本次计算中样长取 2 m。

c. 实验变异函数模拟。进行实验变异函数的计算及理论变异函数的拟合,寻找块金值、基台值、变程,搜索椭球体的参数。

d. 普通克里格计算。用普通克里格法对整个地质体的全部晶胞品位进行估计,最后把估计得到的晶胞可视化。这样,就可以直观地看出该矿体品位的分布规律及其高低走向。

e. 储量计算。根据品位估算的结果、矿体的体积,依据品位条件,计算矿体的矿石量、金属量以及进行资源的评估。

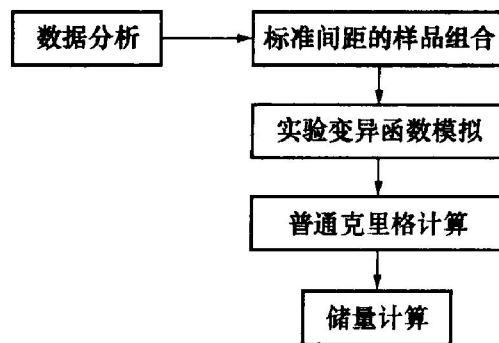


图 6 三维地质体的普通克里格计算框图

Fig. 6 The frame work of computing 3D ordinary Kriging

3 计算实例

西岔金矿位于吉林省集安市花甸子镇横路村西岔,金银矿体是矿床中主要类型,铅银矿体次之,其矿体小且分散。金银矿体有 1, 3, 4, 5, 9 和 12 号共 6 个,其中 3 号金银矿体是主矿体。以 3 号金矿体为例,采用沿水平方向和垂直方向的划分,在水平方向上:以南北为 Y 轴,东西为 X 轴,垂直方向上以高程方向为 Z 轴。开采深度由 490 m 至 0 m 标高,矿区面积为 0.394 5 km²。

a. 块段系统(BLOCK) 原点大地坐标为: $x_0 = 13\ 424\ 522.42\text{ m}$; $y_0 = 4\ 322\ 451.98\text{ m}$; $z_0 = 45.12\text{ m}$; 块段的大小为: X 方向 10.0 m, Y 方向 10.0 m, Z 方向 10.0 m; 块段的数目是: X 方向为 12, Y 方向为 54, Z 方向为 78。块段的总数目为 50 544,但扣除矿体外的块段,实际参加品位估算的块段数为 34 122 个。

b. 变异函数计算时所选用的参数如下: 滞后距为 2 m; 角度容许误差限为 30°; 距离容许误差限为 1 m。

c. 储量计算:依据普通克里格法估算的品位进行金矿的储量计算。其计算公式如下:矿石量为矿体体积与矿体含量之积;金属量为矿石含量与矿石平均品位之和。其中,金矿含量为 34 g/t。

经普通克里格法计算,其变异函数的参数见表 4,计算结果见表 5,矿体的品位分布见图 7,储量计算结果与实际储量对比见表 6。

通过普通克里格法计算的储量结果与实际储量对比可以看出,三维普通克里格法能较准确地计算

表 4 变异函数的计算参数

Table 4 Parameter of variogram

最大 变程/m	块金 值	基台 值	搜索椭球体轴长/m			搜索椭球体角度/(°)		
			第一轴	第二轴	第三轴	方位角	俯角	深度角
67.542	0.343	2.165	67.542	67	45	-45	135	90

表5 普通克里格法计算结果

Table 5 Computing result of ordinary Kriging method

计算 方法	理论数学 模型	平均品位/ ($g \cdot t^{-1}$)	矿石 质量/t	废石 质量/t	金属 质量/kg
普通克 里格法	球状 模型	3.76	475 255.43	473 372.11	1 786.32

表6 普通克里格法计算结果比较

Table 6 Compare with known results

	平均品位($g \cdot t^{-1}$)	矿石质量/t	金属质量/kg
实验结果	3.76	475 255.43	1 786.32
勘探报告	3.86	498 767.43	1 883.32

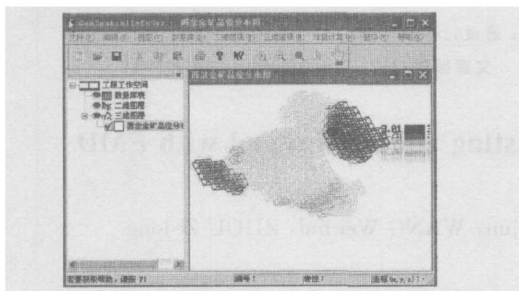


图7 矿体品位分布图

Fig. 7 The picture of mine grade

出矿体的储量,误差为100 kg左右。

4 结 论

a. 该模块采用基于地质体轮廓线的表面建模方法,利用遗传算法生成两轮廓线间的三角面片,完成了对矿体的三维几何建模;并根据实际需要拟定了三维普通克里格法可视化计算流程,对矿体进行空间插值。

b. 以西岔金矿为例,提出了西岔金矿区的普通克里格法可视化计算流程,采用人机交互的形式智能编辑剖面,动态地圈定矿体,实现了西岔金矿的普通克里格法计算可视化。不但完成了对矿体的内部属性建模,并且较准确地计算了西岔金矿的储量,误差在100 kg左右。用不同颜色表达矿体中不同的品位分布,直观地反映了矿体的三维形态,可为研究矿体的空间展布规律提供科学依据,为矿山的经济评价、采矿设计和生产管理提供辅助决策依据。

参考文献:

[1] Bakp M A. Three dimensional representation in a geoscientific management system for the minerals industry [J]. Three dimensional applications in geographic information system. Taylor & Francis, 1989.

[2] 侯恩科, 吴立新. 三维地学模拟几个方面的研究现状

与发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6): 5-8.

HOU En-ke, WU Li-xin. Several aspect research situation and developing trend of 3D geosciences modeling [J]. Coal Geology & Exploration, 2000.

- [3] Jessell M. Three-dimensional geological modeling of potential-field data [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(4): 455-465.
- [4] 张菊明. 三维地质模型的设计和显示[J]. 中国数学地质进展, 1995, 31(7): 189-195.
- ZHANG Ju-ming. Design and display of 3D geology model [J]. Chinese Journal of Progress in Mathematics Geology, 1995, 31(7): 189-195.
- [5] 陈昌彦, 张菊明, 杜永康, 等. 边坡工程地质信息的三维可视化及其在三峡船闸边坡工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 1-6.
- CHEN Chang-yan, ZHANG Ju-ming, DU Yong-kang, et al. 3D visualization of geotechnique information in slope engineering and its application to the permanent ship lock slope in the three gorges project [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 1-6.
- [6] 毛善军, 许友志, 张海荣, 等. 空间地质模型及其可视化系统[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(4): 335-337.
- MAO Shan-jun, XU You-zhi, ZHANG Hai-rong, et al. Spacial geological model and system of visualization [A]. Journal of China University of Mining and Engineering, 1999, 28(4): 335-337.
- [7] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋, 等. 岩体结构三维可视化模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 11(4): 55-59.
- CHAI He-jun, HUANG Di-long, HUANG Run-qiu, et al. New progress in the study of rock structure 3D visualization model [J]. Advances in Earth Science, 2001, 11(4): 55-59.
- [8] 张煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用[J]. 中国图形图像学报(A), 2001, 6(3): 285-290.
- ZHANG Yu, BAI Shi-wei. An approach of 3D stratum modeling based on triprism volume elements [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(3): 285-290.
- [9] Carr J R. On visualization for assessing Kriging outcomes [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(4): 421-433.
- [10] Virendra K, Peter M F. Constructive solid geometry approach to three dimensional structural shape optimization [J]. AIAA Journal, 1992, 30(5): 1408-1415.
- [11] Daminan C. Constructive solid geometry using the isoluminance contour model [J]. Computers & Graphics, 1991, 15(3): 341-347.
- [12] DeFanti T A, Brown M D. Visualization in scientific computing [J]. Advances in Computers, 1991, 33: 247-305.
- [13] Holland J H. Genetic algorithms [A]. Scientific American, 1992, 267(1): 66.
- [14] Jaroslav V, Jana K. Genetic algorithms in system procedures [J]. Neural Network World, 2002, 12(3): 211-221.
- [15] Mark B. Using genetic algorithms [J]. C/C++ Users Journal, 2002, 20(6): 20-29.