

三维地质建模及可视化技术 在固体矿产储量估算中的应用

张宝一^{1,2}, 尚建嘎^{1,2}, 吴鸿敏¹, 刘修国^{1,2}, 吴信才^{1,2}

(1. 中国地质大学信息工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉中地数码科技有限公司, 武汉 430074)

[摘要] 将三维 GIS 技术、三维地质建模及可视化技术与固体矿产储量估算相结合, 对于提高储量估算和管理的智能化和自动化水平, 具有重要意义。文章提出了一种利用三维地质建模与可视化技术进行固体矿产储量估算的可行性方案。并提出了应用轮廓线进行三维矿体表面建模时尖灭与分支情况处理、带约束的三维矿体表面建模的解决方案。

[关键词] 三维地质建模 储量估算 可视化 三维 GIS

[中图分类号] P628; P624.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2007)02-0076-06

0 前言

利用计算机信息技术提升和改造传统的地质矿产勘查技术水平, 对于提高矿产储量估算和管理的智能化和自动化水平, 提高工作效率, 具有重要意义。随着计算机图形学技术、三维 GIS 技术和数据库技术的迅猛发展和日渐成熟, 将三维 GIS 技术、三维地质建模及可视化技术与固体矿产储量估算相结合, 形成先进实用的储量估算软件是目前国内地学信息研究的重要方向之一。而矿山行业也迫切需要一个集三维矿体建模与可视化、矿山信息管理等功能于一体的三维 GIS 应用软件系统。

1 三维地质建模及可视化

三维地质建模及可视化的研究是目前国内外地学研究领域的热点之一。所谓三维地质建模是指采用适当的数据结构在计算机中建立能反映地质构造的形态和各要素之间关系以及地质体物理、化学属性空间分布等地质特征的数学模型。利用地质体三维可视化技术以直观的方式展示地下三维空间的极其不规则的地质构造、矿体、勘探工程(槽探、井探、坑探、钻探)、巷道等实体, 能够帮助地质工作者形象地、有联系地处理大量的固体矿产勘查中的野外测量和样品分析数据, 从而更有效地指导矿业开发,

减少固体矿产勘查的风险。

随着三维地质建模及可视化基础理论研究的深入^[1-7], 国内外地质矿业界开始在生产领域采用三维可视化技术, 涌现了众多地质采矿三维可视化方面的软件。比较有代表性的有澳大利亚 SURPAC 公司的 SURPAC 软件、Micromine 公司开发的 Micromine 软件、MAPTEK 公司开发的 VULCAN 软件, 加拿大 LYNX GEOSYSTEM 公司开发的 LYNX 与 MicroLYNX + 软件、Gemcom 公司的 Gemcom 软件, 以及英国 MICL 公司的 DataMine & Guide 软件等。

时至今日, 在矿山地质三维可视化软件研究方面, 国外已形成了技术含量高且价格昂贵的计算机软件系统, 而国内仅仅是做了一些探索性的研究工作^[8-13]。例如, 中国矿业大学吴立新等基于 LYNX 进行了三维地学模拟可视化技术在煤矿的应用研究; 中国地质科学院的肖克炎等基于 Vulcan 软件系统建立了阿舍勒铜锌矿床三维立体模型, 并且对地学空间信息三维可视化智能分析技术进行了研究。

2 固体矿产储量估算流程

利用三维地质建模与可视化技术进行固体矿产储量估算是一个较复杂的系统工程, 是根据勘查工程获取的信息对矿床的矿体形态、矿石质量、品位、伴生元素分布、矿石量、金属量进行科学的估算, 尽

[收稿日期] 2006-02-08; **[修订日期]** 2006-04-12; **[责任编辑]** 曲丽莉。

[基金项目] 中国地质调查局项目“矿产资源调查野外数据采集系统”(编号: 200318200001) 资助。

[第一作者简介] 张宝一(1979年—), 男, 2001年毕业于中国地震局地震研究所, 获硕士学位, 在读博士生, 助理研究员, 现主要从事三维地质建模研究工作。

管不同矿产、不同勘探阶段资源储量估算方法侧重点会有所不同,但都具有相似的工作流程,如图1所示。

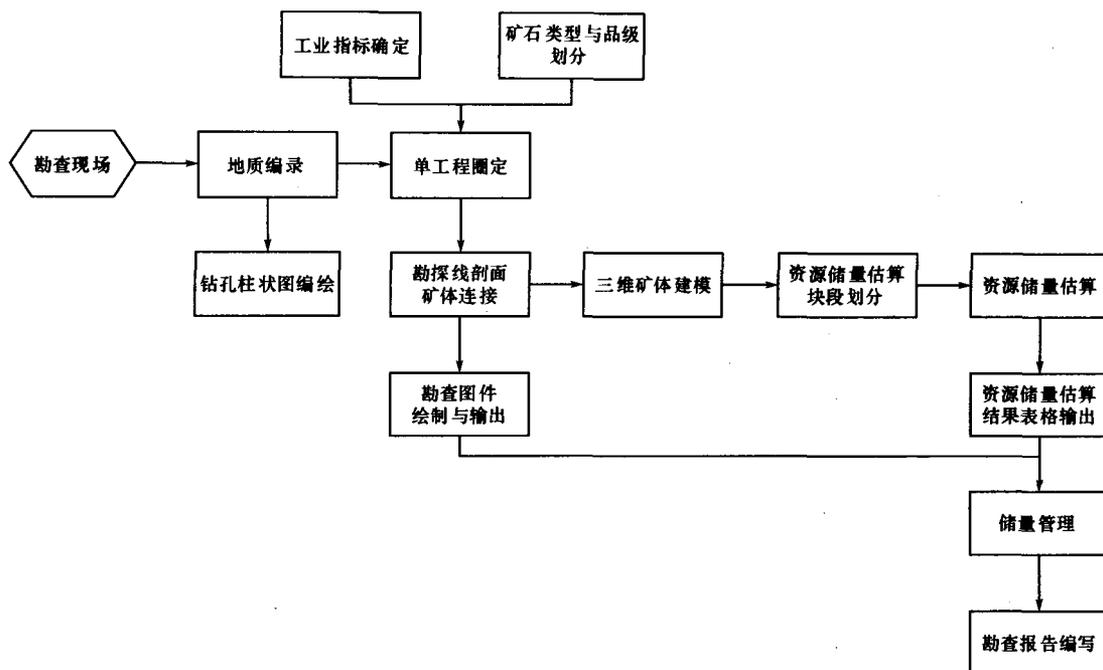


图1 固体矿产三维可视化储量估算流程图

2.1 数据管理

固体矿产储量估算涉及的数据来源广泛、类别众多、数量庞大,其中包括矿区的基础地质地理数据、勘探工程产生的地质编录数据和样品分析数据、储量估算的中间成果和最终成果数据、及矿体三维模型数据等,这些数据大致可以分为以图件方式存储的空间数据和以表格方式存储的属性数据。这两类数据经过规范化后,可选用商业化的空间数据库引擎(SDE),如 MAPGIS SDE,来进行统一存储与管理。

2.2 单工程圈定

对于单个勘探工程的采样分析数据,要根据矿床工业指标(包括边界品位、最低工业品位、最低可采厚度、夹石容许厚度等参数)来圈定单工程内矿体的形态、厚度和位置,不同矿产、不同勘探阶段所采用的单工程圈定方法也有所不同。单工程矿体圈定的目的是为了圈定出单工程内矿体的边界点,并充分展示矿体的连续性,为在勘探线剖面上进行矿体连接做准备工作。传统的单工程圈定一般是地质人员手工完成的,计算繁琐、工作量大,因此应采用计算机程序来实现单工程圈定的过程,同时也允许地质人员交互地修改圈定的结果。

2.3 矿体截面圈定

矿体截面形态的连接是在单工程圈定的基础

上,一般由地质人员分别在储量估算剖面图或平面图上手工圈定的,剖面图与平面图在矿体截面形态圈定时虽略有差异,但其基本原理相同。以剖面图为例,对于勘探线剖面上两个相邻见矿工程的矿体,如赋存部位互相对应,符合地质规律,则应在剖面上将这两个工程所见的矿体连接成同一矿体;如见矿工程以外无工程控制,或未见矿工程到见矿工程之间距离远大于勘探时所要求的相应控制间距时,则由见矿工程向外推断矿体之边界或以相应勘查工程间距的二分之一尖灭矿体,地质人员可以在用户交互界面下圈定矿体的截面形态,由计算机来实现矿体截面的面积计算和品位计算。

2.4 三维矿体建模

轮廓线重构面技术是由剖面上的矿体截面形态来构建三维矿体表面的主要算法。二维轮廓线重构三维表面有着广泛的应用前景^[8-9,14-15]。例如,像CT采样数据场这样的三维数据,可以看成是由一些二维数据场按一定顺序排列组成的,各截面数据之间有很大的相关性。截面数据广泛存在于医学、生物、地质、无损探伤等应用领域,其各截面间相互平行,每一截面与实体的交线就是实体在该截面的轮廓线。如果先在各层之间找出物体的边界线,再利用截面之间的连贯性,就可以从一系列截面上的轮廓线中推导出相应物体的空间几何结构。应用轮廓

线重构面技术构造的三维矿体表面模型类似于不规则三角网(TIN),如图2所示,因此其存储方式也可以采用类似 TIN 的数据结构。

将勘探区的所有勘探线剖面放置到三维空间,按照矿体的趋势,利用轮廓线重构面技术在相邻勘探线之间用三角网连接三维矿体表面;在矿体的两段封闭起来,就形成了矿体的实体。矿体封闭的方

式分为轮廓线直接封闭和矿体尖灭两种方式。轮廓线直接封闭可以将轮廓线投影到二维平面,直接进行二维 Delaunay 三角化;矿体尖灭方式可以分为多边形尖灭、线尖灭和点尖灭 3 种方式,如图3所示,地质人员可以在三维环境下输入矿体尖灭的多边形、线或点。

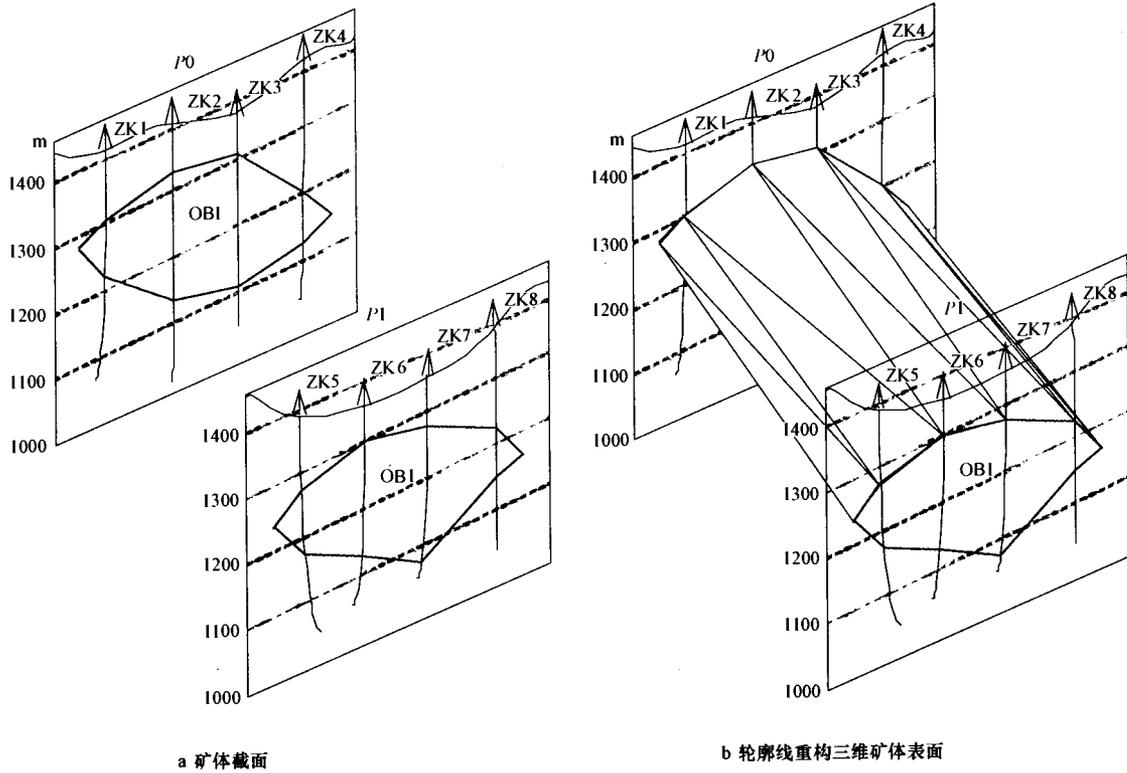


图2 三维矿体表面模型重构

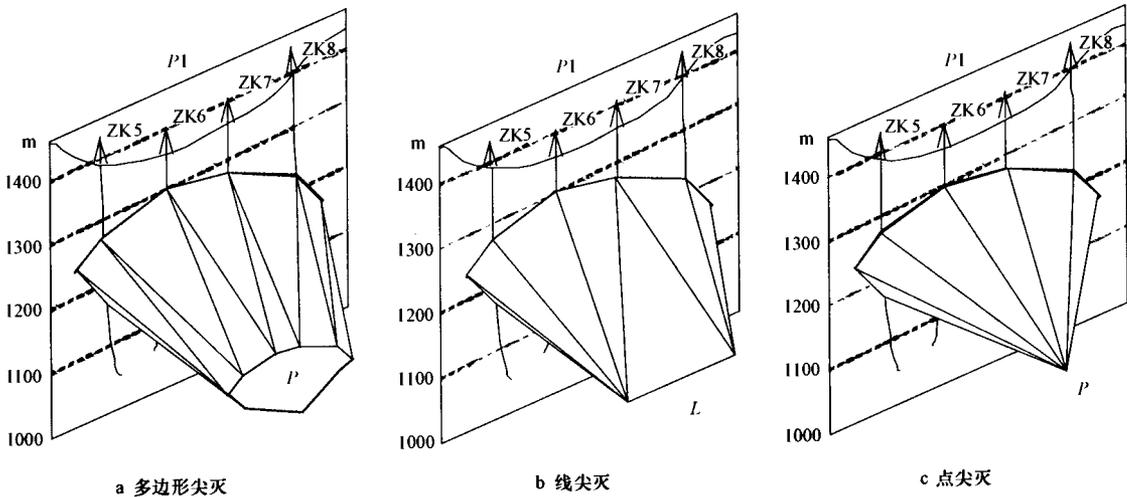


图3 矿体尖灭方式

上文中的矿体实体模型是以 TIN 面表示的空间闭合实体,属于三维矢量模型,单独用矢量模型难以

表达矿体内部品位等属性的不均匀性^[6],因而就无法应用地质统计学方法进行储量估算。如果单独使

用三维体元模型虽然满足了地质统计学储量估算的要求,却很难满足描述极其不规则的矿体边界的精度要求,三维模型的可视化与分析也极其耗时^[6]。因此文章采用矢量与体元混合的数据模型,即矿体三维表面选择 TIN 模型,可以表达非常复杂的实体表面起伏变化情况,用于进行三维表面的可视化和分析;矿体三维体元模型选择规则体元进行表达,也称为矿房模型,并使用八叉树技术(Octree)对其进行压缩,这种数据模型主要用于程序内部的储量估算。

将矿体三维 TIN 表面转换为三维体元模型的过程,可以看作是对多面体的三维栅格化。将多面体栅格化成规则体,关键是要判别点与多面体的位置关系。点与多面体的位置关系判断方法主要有基于交点个数法和向量运算法两种。基于交点个数法的基本思想是:从待估点任意发出一条射线,利用方向包围盒(OBB)或空间二分树(BSP)计算射线与多面体的交点,如果与多面体中的三角形交点数为偶数,则该点在多面体外,如为奇数,则该点在多面体内。向量运算法的基本思想是:首先利用方向包围盒或空间二分树找出多面体中与待估点最近的三角形,然后从该点向三角形发出一条射线,计算射线向量与三角形法向量的点积,点积为正,则点在多面体内,点积为负,则点在多面体外。

2.5 储量估算与管理

矿体的自然形态是复杂的,且深埋地下,各种地质因素对矿体形态的影响也是多种多样的,因此,在传统的储量估算中只能近似地用规则的几何体来描述或代替真实的矿体,求出矿体的体积。由于计算体积方法的不同和划分计算单元方法的差异,形成了各种不同的储量估算方法,常用的有算术平均法、地质块段法、开采块段法和断面法(包括垂直剖面法和水平断面法)等。在矿体三维模型建立后,计算机可以根据地质人员的指令来交互式地划分块段,块段体积计算和储量估算都可以由计算机来完成。建立了矿体的三维体元模型后,也可以根据地质统计学的理论与方法进行矿体的储量估算。

在储量估算的基础上,可以由计算机对任何块段和矿区资源储量进行分类管理和品位吨位曲线统计,并自动生成矿区储量分布图、储量等值线图、品位吨位模型、储量分类统计(参照 GB/T 17766 - 1999《固体矿产资源/储量分类》)和经济价值分析等图表。

3 用轮廓线重构面技术进行三维矿体建模

由于实际矿体的复杂性和不规则性,决定了在二维轮廓线重构表面时存在很多不确定的情况,因此在进行表面重构时,需要考虑的情况也会相当复杂。

3.1 基于相连段的轮廓线重构矿体表面

由于矿体大多是深埋地下的,因此对矿体形态信息的获取十分困难,必须充分利用矿区的所有相关数据。一般矿区的纵剖面(沿矿体走向的剖面)、物探数据、遥感数据等能在一定程度上揭示矿体的部分形态,如图 4a 中揭示的矿体 OB1 的边界线 L_1 、 L_2 和 L_3 ,这些数据在三维矿体建模中应予以利用。基于相连段的轮廓线重构面技术的基本思想是使用辅助线,将所有相连段与轮廓线连接成为一个整体,再连三角网,如图 4 所示。

3.2 轮廓线重构带分叉的矿体表面

当同一矿体在相邻的勘探线剖面上的轮廓线数目不同时就会出现分支问题,如图 5a 所示,剖面 P_0 中矿体 OB1 中的 1 条轮廓线对应了剖面 P_1 的 2 条轮廓线。在这种情况下不能直接进行轮廓线之间的拼接,而需要对分支轮廓线进行处理,使得出现分支情况的轮廓线转变为一对一的轮廓线对应关系。

目前有许多专家学者都已经提出了分支问题的解决方案,但由于实际分支情况的复杂性以及分支轮廓线的形态各异,还没有一种能完全自动解决实际分支问题的方案^[14-15]。在复杂情况下,通常是进行人机交互来引导分支问题的最终实现,如图 5 所示,输入轮廓线分叉的辅助线 L 。

4 结论

现代勘查技术的发展以及 GIS 数据库信息的积累(如中国地质调查局启动的“矿产资源调查野外数据采集系统”项目等),使得三维地质建模与可视化技术成为地学信息研究的热点。可视化技术不仅可以对勘探工程的布置做出指导,确保勘探设计的科学性,减少勘探风险,并且将大大提高固体矿产勘查的效率,具有极其重要的意义。文中的部分算法已经在中国地质调查局内部项目“矿产资源调查野外数据采集系统”的子项目“固体矿产勘查资源储量估算子系统”中实现,并将后续在矿山行业推广应用。

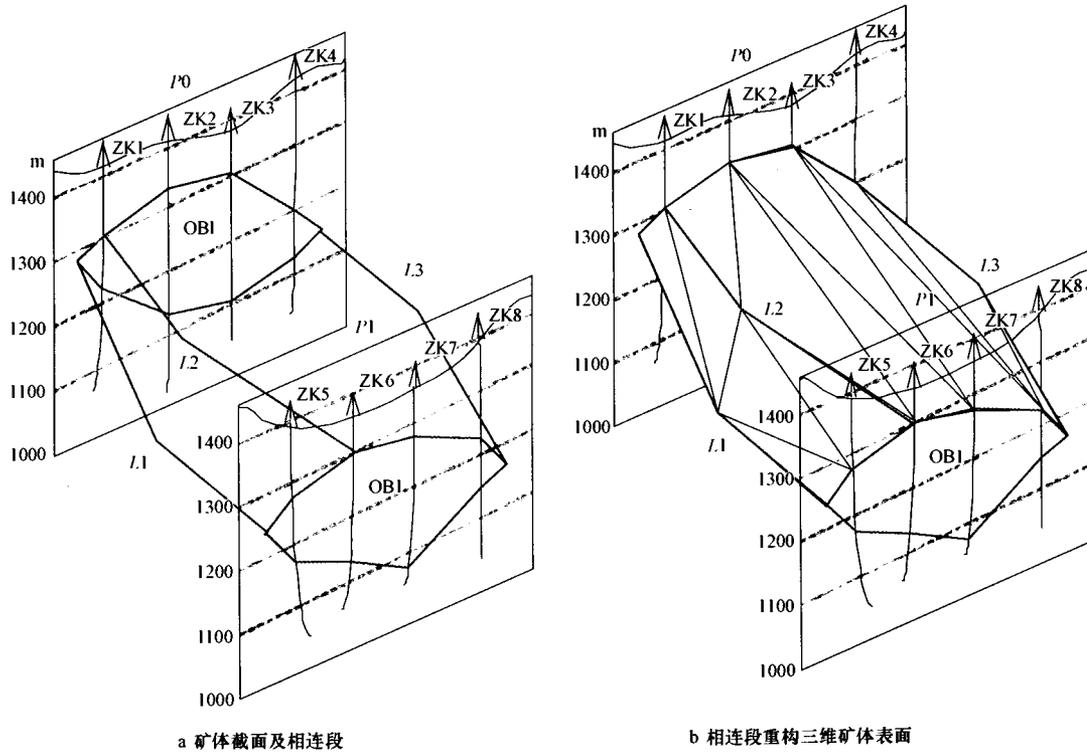


图4 基于相连段的轮廓线重构矿体表面

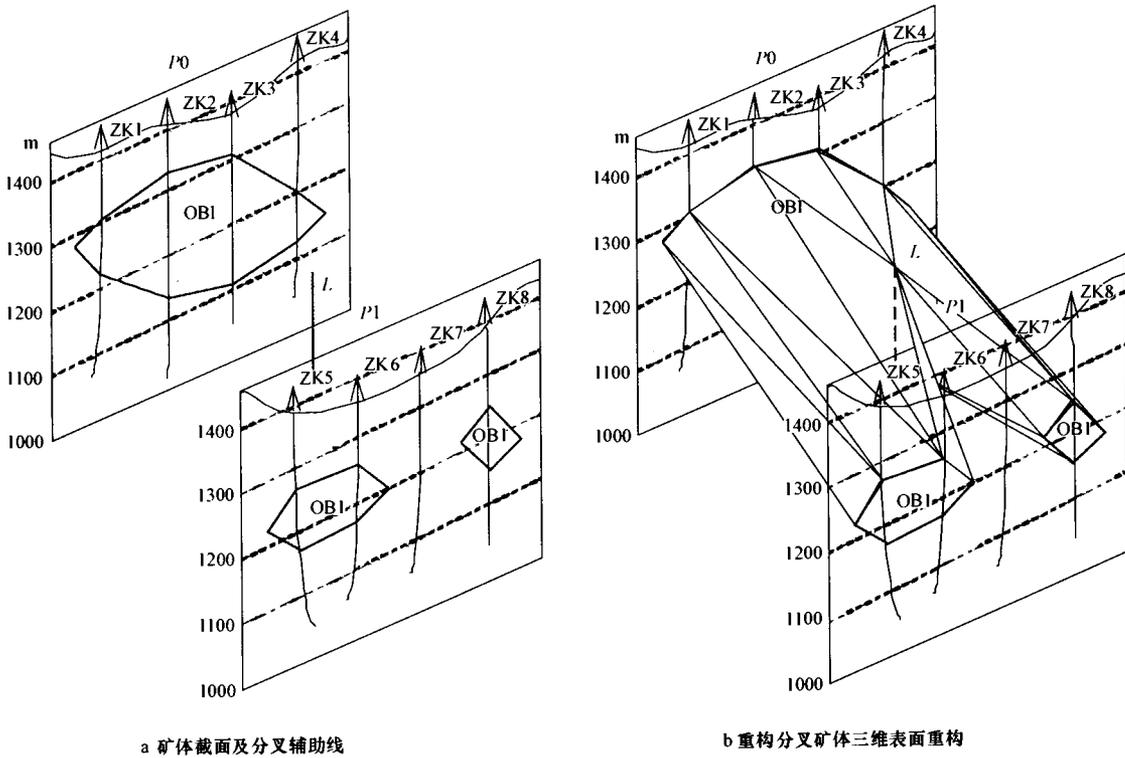


图5 轮廓线重构分叉矿体的三维表面

中国地质调查局发展研究中心李超岭研究员在研究过程中给予了大力帮助,在此谨向他表示诚挚的敬意和感谢。

[参考文献]

- [1] 吴健生,朱谷昌,曾新平,等. 三维 GIS 技术在固体矿产勘探和开发中的研究与应用[J]. 地质与勘探,2004,40(1):68-72.
- [2] 吴立新,张瑞新,戚宜欣,等. 三维地质模拟与虚拟矿山系统[J]. 测绘学报,2002,31(1):28-33.
- [3] 吴冲龙,汪新庆,刘刚,等. 地质矿产点源信息系统设计原理及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [4] 侯景儒,黄竞先. 地质统计学在固体矿产资源/储量分类中的应用[J]. 地质与勘探,2001,37(6):61-66.
- [5] 毛善君,马洪兵. 自动构建复杂地质体数字高程模型的方法研究[J]. 测绘学,1999,28(1):57-61.
- [6] 曹代勇,李青元,朱小弟,等. 地质构造三维可视化模型探讨[J]. 地质与勘探,2001,37(4):60-62.
- [7] 芮小平,余志伟,许友志. 关于构建矿山三维 GIS 的思考[J]. 地质与勘探,2001,37(4):63-67.
- [8] 徐云和,赵吉先,程朋根,等. 地矿三维 GIS 模型的构建及可视化[J]. 中国矿业,2003,12(4):60-62.
- [9] 程朋根,陈红华,刘少华,等. 地矿三维数据模型及其可视化方法的研究[J]. 中国矿业,2002,11(2):60-62.
- [10] 何满潮,李学元,刘斌,等. 非层状岩体三维可视化构模技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):774-779.
- [11] 何满潮,李学元,刘斌,等. 侵入型岩体三维可视化构模技术研究[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(8):29-32.
- [12] 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]. 中国图象图形学报,2001,6A(3):285-290.
- [13] 毛先成,戴塔根. 地质体几何造型应用[J]. 中南工业大学学报,1997,28(3):209-211.
- [14] Christiansen H N, Sederberg T W. Conversion of complex contour line definitions into polygonal element mosaics [J]. Computer Graphics,1978 (12):187-192.
- [15] EKOULE A B, PEYRIN F C, ODET C L. A triangulation algorithm from arbitrary shaped multiple planar contours [J]. ACM Trans. Graph,1991,10(2):182-199.

APPLICATION OF 3D GEOLOGICAL MODELING AND VISUALIZATION IN SOLID MINERAL RESOURCE ESTIMATION

ZHANG Bao-yi^{1,2}, SHANG Jian-ga^{1,2}, WU Hong-min¹, LIU Xiu-guo^{1,2}, WU Xin-cai^{1,2}

(1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. Wuhan Zondy Cyber-Tech Co. Ltd., Wuhan 430074)

Abstract: It is significant to introduce 3D GIS, 3D geological modeling and visualization into solid mineral resource estimation to improve intelligentization, automation and work efficiency of resource estimation. A new approach and efficient methods of solid mineral resource estimation is presented using 3D geological modeling and visualization. An optimal solution to reconstruct orebodies' pinch-out zones and branches is also proposed using the algorithm of 3D surface reconstruction from 2D contours. During the modeling process, it is allowed to control models' reconstruction on the basis of experience, knowledge and interpretation of geological structures and geophysical data.

Key words: 3D geological modeling, solid mineral resource estimation, visualization, 3D GIS