技术·方法

基于钻孔数据的矿山三维地质建模及可视化过程研究

向中林[1,2], 王　妍[1], 王润怀[1], 刘玉芳[1], 刘顺喜[1]
(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作　454000;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京　100083)

[摘　要]矿山三维地质建模与可视化技术研究, 是"数字矿山"的核心组成部分, 是现代矿山信息化研究的热点和重点。文章从三维地质建模的概念出发, 探讨了基于钻孔数据的矿山三维地质建模及可视化的一般过程, 包括地质数据库的建立, 实体模型、品位块体模型的创建等, 重点探讨了建模过程中地质数据库的设计, 地质解译、矿体储量估算的方法与技术, 并借助 OpenGL 三维图形开发库, 在 VC++6.0 编程环境下, 实现了三维地质的建模及可视化, 为我国矿山三维地质建模及可视化软件的设计提供参考, 促进了我国矿山信息化的建设。

[关键词]三维地质建模　可视化　矿山　钻孔数据　储量估算
[中图分类号]P628　[文献标识码]A　[文章编号]0495-5331(2009)01-0075-07

0　概述

20 世纪 90 年代以来, 随着计算机硬件性能的提高及计算机图形学技术、三维 GIS 技术和数据库技术的迅猛发展和日渐成熟, 在地学领域, 以平面图和剖面图为主的传统的地质信息的模拟与表达难以满足现代矿山信息化趋势的急切需求, 三维地质建模及可视化的研究已受到广泛重视。所谓三维地质建模(3D Geosciences Modeling), 就是指采用适当的数据结构, 在三维环境下, 综合运用现代空间信息理论和计算机技术, 将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来[1-5], 来研究地质体几何结构及其内部物理、化学属性等地质信息, 并用于地质分析与资源储量估算的技术。它是由地质勘探、数学地质、地球物理、矿山测量、矿井地质、GIS、图形图像和科学计算可视化等学科与技术交叉而形成的一门新兴技术[6]。这一概念最早是由加拿大的 Simon W Houlding 于 1993 年提出[7-11]。相对于传统的二维地质数据表示方法, 三维模型能够完整准确地表达各种地质现象, 快速直观地再现地质单元的空间展布及其相互关系, 挖掘隐含的地质信息, 方便工程决策、地质分析和自动制图[12-13]。而钻孔又是获取三维地质信息的最直观、准确和详细的手段, 如何根据钻孔数据构建三维地质模型? 文章探讨了基于钻孔地质数据库进行三维地质建模与可视化的过程, 并在 VC++6.0 编程环境下, 借助于 OpenGL 图形库, 基本实现了基于钻孔数据的矿山三维地质建模及可视化。

1　基于钻孔地质数据库的建立

地质数据是三维地质建模的基础和前提, 也是实际项目中矿山资源评估和采矿设计的基础, 是矿山生产管理的重点。针对具体项目来说, 地质数据的完善性和可靠性, 直接影响到地质模型的准备性, 从而影响到一个矿山的生产经营和决策。而且地质数据是随着工程的推进而适时增加和更新的, 为了体现地质模型的灵活性, 在地质建模的过程中, 地质模型基础数据的管理也异常关键, 数据库是一种有效的管理数据的工具, 可以方便的对数据进行检索、管理, 因此这里采用地质数据库来管理钻孔地质数据。

地质数据一般主要以工程钻探形式获得(此外还有坑探、槽探等), 通过钻孔, 来获取基本岩性信息和取样分析数据。其描述地质信息的基本形式为(表 1):

[收稿日期]2008-04-28; [修订日期]2008-07-16。
[基金项目]国家"十五"科技攻关项目(编号:2001BA803B0402)资助。
[第一作者简介]向中林(1976 年—), 男, 2008 年毕业于中国地质大学(北京), 获硕士学位, 讲师, 现主要从事矿产资源勘查评价与开发研究工作, 地理信息系统的开发与应用的教学与研究工作。

表 1 钻孔地质信息

钻孔号	钻孔起点坐标	钻孔测斜数据	从	到	岩性描述	品位描述	其他描述
…	…	…	…	…	…	…	…

其中钻孔号用来确定工程的代号,钻孔起点坐标描述工程的起点坐标,测斜数据描述工程的轨迹线。不管钻探、坑探还是槽探,我们都可以认为是从一个起点,顺着工程的方向,从…到…来描述工程,只要给定工程的开口坐标和轨迹线(测斜数据),就可以在三维空间,确定某段岩性的品位、岩性、坐标等情况。这样我们就将地质数据描述成二维表,为数据库处理提供前提。

考虑到数据的冗余和参照完整性,我们这里采用关系数据库模式将上述地质信息表分成 4 个基本关联表,钻孔表(Collar tabel),测斜表(Survey tabel),岩性表(Geology tabel),样品表(Sample tabel)。钻孔表存储的信息包括钻孔的开孔位置(孔号 Hole_id 及 X/Y/Z 坐标),钻孔的最大深度 Max_depth,钻孔的孔迹 Hole_path(指在钻孔摘取的时候用到的数学法则,表明钻孔的轨迹性质,包括直线 LINEAR、曲线 CURVED 和垂直 VERTICAL 三种类型)等;测斜表存储钻孔测斜信息,被用来计算钻孔空间位置,基本的字段包括钻孔号(Hole_id)、测斜深度(Depth)、钻孔的方位角(Azimuth)和倾角(Dip)等;岩性表和样品表存放地质岩性信息和样品化验数据。每个表通过"钻孔代号"建立关联。当然也可以根据实际项目的需要增加其他信息表,例如根据不同样品品位显示不同风格,方便地质解译的钻孔显示样式表。图 1 是化验数据为金时各数据表的字段设计及关联图,这样设计的优点:

1) 数据清晰,各个表各结构单一;

2) 将钻孔定位、测量、编录、取样工作分开,符合矿山实际工作流程;

3) 数据冗余达到最小;

4) 符合关系数据库格式,可以轻松的将数据存于各种数据库产品中(如 Access,SQL Server,FoxPro 等),方便的进行数据管理。

在地质建模过程中,可以通过 ODBC 连接钻孔地质数据库,ODBC(Open database connectivity),开放性数据库接口,是微软倡导的、当前被业界广泛接受的、用于数据库访问的应用程序编程接口,通过它可以访问 Access,dBASE,Paradox,Oracle,Informix,SqlServer 等数据源,也可以通过网络连接 ODBC 数据源。

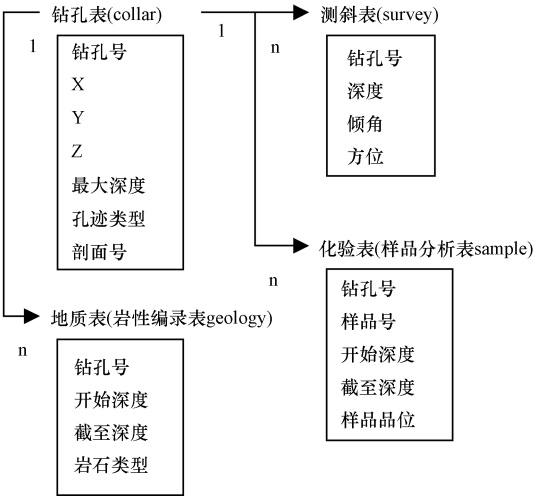

图 1 钻孔地质数据库中基本数据表的字段设计及关联图

2 基于钻孔数据的矿山三维地质建模与可视化过程

基于建立的钻孔地质数据库,进行矿山三维地质建模与可视化,完成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地质信息对矿床的矿体形态、矿石质量、空间分布、地质体的空间关系进行可视化表达的过程。一般包括钻孔数据的三维空间显示与检查、地质解译及实体建模、样品分析及品位块体建模三个过程。具体流程如图 2 所示。

2.1 钻孔数据的三维空间显示与检查

建立了钻孔地质信息数据库,就可以在三维空间显示地质工程,如钻孔轨迹线、岩性及描述、品位值、坑道取样轨迹、断层等,在三维空间了解、分析地质现象。显示钻孔时,一般需要做一些准备工作。即沿着钻孔的方向,对不同的岩性着不同的颜色、不同的品位区间显示不同的风格,方便下一步的地质解译工作,效果如图 3 所示。此外,及时检查钻孔数据,虽然在钻孔数据建库的过程中完成了大部分的数据关联检验,但像样长的异常,钻孔的错位等错误有时仍然存在,我们在三维空间中直观地检查比在繁多数据表列中检查来得容易。

2.2 地质解译及实体建模

实体模型,通常也叫外框图,是一种通用的技术定义,广泛应用在地层带、矿体、煤层、采场设计中。在三维地质建模中,一般包括地层实体模型、矿体模型和岩体模型等。实体模型一般通过一组或多组剖

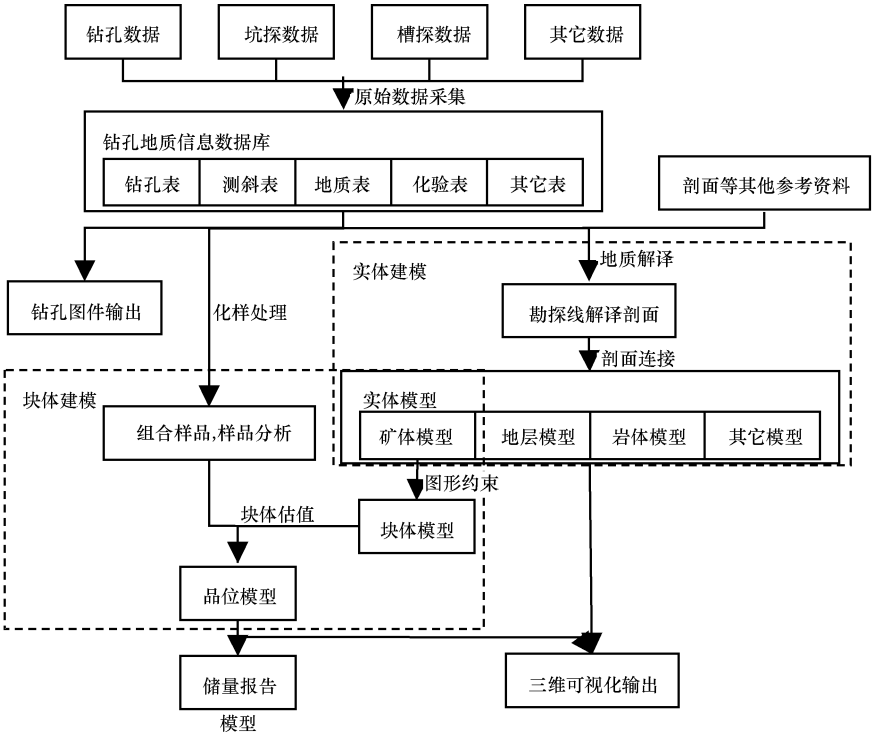

图 2　三维地质建模及可视化流程图

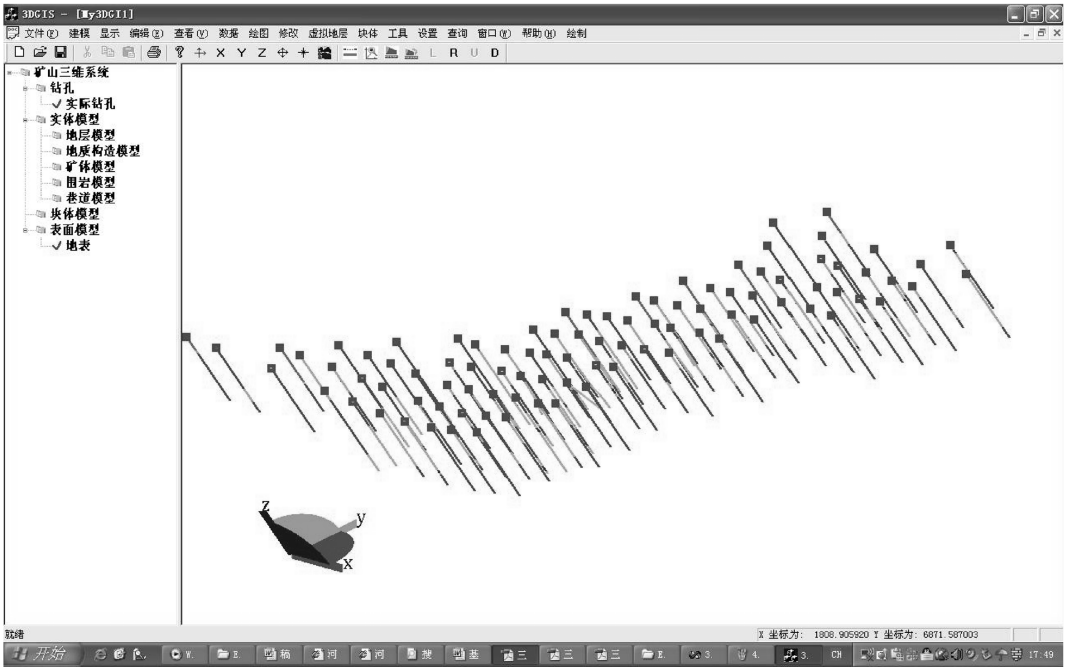

图 3　钻孔的显示的效果图

面多边形联结来定义一个实体或空心体,借鉴不规则三角网(TIN)表达复杂地貌、地层曲面的灵活性,实体模型实际是利用轮廓线重构面技术构建一个封闭的三角网,即由剖面上的实体截面形态来构建三维实体表面,所产生的形体可用于可视化、体积计算、在任意方向上产生剖面以及与来自地质数据库的数据相交。

其中怎样从复杂的钻孔数据中勾勒出各剖面多边形的形态,这是形成实体模型准确性的关键。根据不同实体模型的要求,需要运用有关地质知识,对于矿体模型,除了根据矿床工业指标(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)外,还需要联系地质地层、构造及岩体有关知识和工程揭露情况等,对地层产状、地质构造进行推测分析,对钻孔数据进行比较,圈定剖面内矿体的形态、厚度和位置。这就是地质解译的内容。地质解译是以岩性或钻孔分析样品等控制特征为条件,将地质信息进行离散化,从而确定地质、矿体边界和相关特征描述。地质解译是综合运用地学知识,从已有数据知识挖掘的过程。

在地质解译过程中,对于勘探线剖面上两个相邻见矿钻孔的矿体,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钻孔所见的矿体连接成同一矿体;如见矿钻孔以外无钻孔控制,或未见矿钻孔到见矿钻孔之间距离远大于勘探时所要求的相应控制间距时,则由见矿钻孔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。

地质解译结束后,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;再将矿体的两端封闭起来,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[14];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。

对于地层模型,可以直接通过读取钻孔地质数据库中的钻孔表(collar)、测斜表(survey)、地质表(geology),创建相应的数据结构,将各个表中数据保存到相应的结构数组中,按照岩性相同和空间连续的原则,将地层分层,并进行 Delaunay 法三角剖分,获得各个地质体顶底面三角网,利用求边界算法获得顶底面三角网的边界边,然后按照最短边法,将顶底面缝合,形成一个完整封闭地质体[15],效果如图 4 所示。如果将顶底面上各个相应的上下各个三角形端点连接,可将地质体分割成无重复的广义三棱柱体体元组[16],用于地质体空间分析。

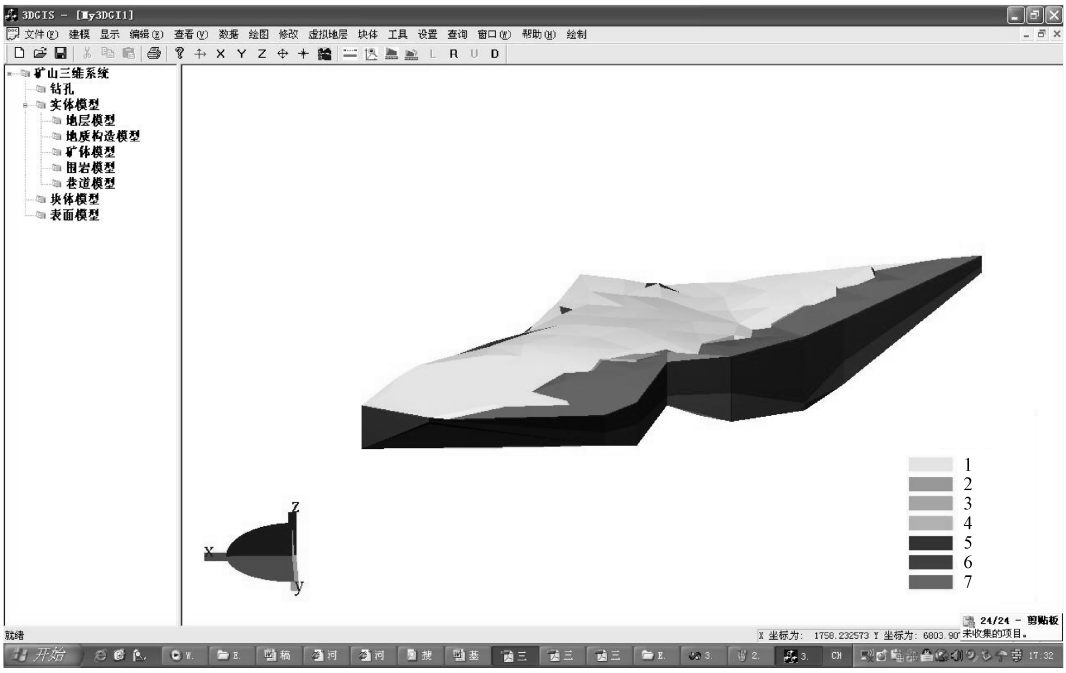

图 4 实体模型的效果图

1—砂岩;2—页岩;3—片岩;4—石英脉;5—泥岩;6—浸入体;7—玄武岩

对于地质矿床实体模型来说,一般先根据钻孔岩性解译出地层模型和岩体模型,然后利用一般矿体随岩体顺层侵入的特点(当然根据具体矿床的特点),参照地层模型和岩体模型,分析断层构造特点,最后勾勒矿体模型。通过矿体实体模型,可以形象直观的了解矿山矿体的产状、几何形态、空间分布,研究矿体与围岩、地层、构造的关系和矿体形成的规律,进而对临近区域作出比较准确的预测。

2.3 样品分析及品位块体建模

基于离散钻孔实体建模获得了矿体的空间几何形体,但缺少物理化学属性地质信息,而矿山矿体的储量估算往往也是矿山三维地质建模的一项重要功

能。同一矿体,揭露钻孔样长参差不齐,品位各有差异,首先需要针对样品数据进行预处理,统计出平均样长进行样品组合处理,即将几个相邻样品组合成为一个组合样品,并求出组合样品的品位。对于极值品位进行处理,极值样品是指那些品位值比绝大多数样品的品位(或样品平均品位)高出许多的样品,处理方法一般根据矿区实际经验进行限值处理或删除处理。预处理过后,往往需要做一些统计学分析可以提供不少有关矿床的有用信息。主要目的是确定:品位的统计分布规律及其特征值;品位变化程度;样品是否属于不同的样本空间;根据样品的分布特征,初步估计矿床的平均品位以及对于给定边界品位的矿量和矿石平均品位。

钻孔揭露的样品数据毕竟有限,还需要三维矿体的品位块体建模。三维块状模型是将矿体划分为许多单元块形成的离散模型[17],单元块一般是尺寸相等的长方体,效果如图 5 所示。随着计算机在矿山的普及应用和计算机的容量与速度的不断提高,三维块状模型在国际上得到越来越广泛的应用。三维块状模型不仅被广泛用于品位、矿量计算,也被用于露天矿最终开采境界优化和开采计划优化。

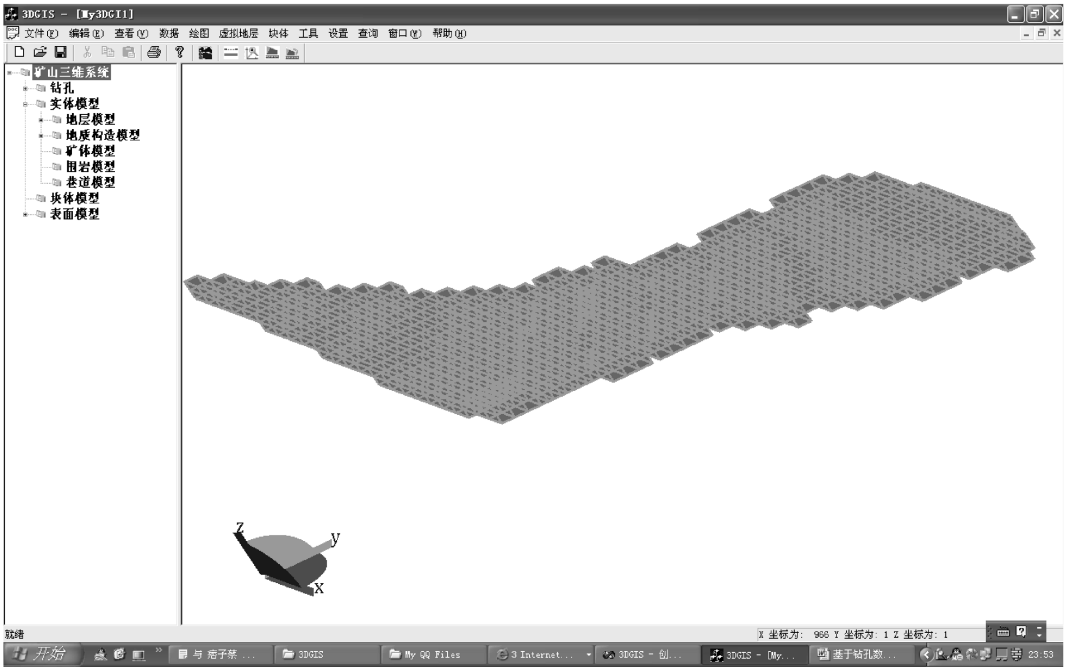

图 5　三维块段模型的效果图

三维块段模型中单元块的高度一般等于最薄矿体台阶高度,单元块在水平方向一般取正方形,其边长视具体情况而定。一般的经验规则是,单元块在水平方向上的边长不应小于钻孔平均间距的 1/4 或 1/5。

将矿床分为单元块后,需要应用某种方法对每一小块的平均品位进行估计。常用的方法主要有三种,即最近样品法、距离 N 次方反比法和地质统计学法(即克里金法)[18]。三者均基于样品加权平均的概念,即对落在以单元块为中心的影响范围内的样品品位进行加权平均求得单元块的品位。三种方法的根本区别在于所用权值不同。其中最重要和用的最广的是地质统计学法。

传统统计学计算都基于样品独立假设,但是在实践中,相互独立性是几乎不存在的,钻孔的位置(即样品的选取)在绝大多数情况下也不是随机的。当两个样品在空间的距离很小时,样品间会存在较强的相似性,而当距离很大时,相似性就会减弱或不存在。也就是说,样品之间存在着某种联系,这种联系的强弱是与样品的相对位置有关的,矿床的品位是一个区域化变量,而控制这一区域化变量之变化规律的是地质构造和矿化作用。地质统计学法就是根据待估样本点(或块段)有限邻域内若干已测定的样本点数据,考虑了样本点的形状、大小和空间相互位置关系,与待估样本点的相互空间位置关系,以及变异函数提供的结构信息,对待估样本点值进行的一种线性无偏最优估计。其优点在考虑样本点位置方向和彼此之间距离的基础上,直接测定空间结

构的相关性和依赖性,研究具有一定随机性和一定结构性的各种变量的空间分布及变异规律。

在品位块体模型赋值过程中,为减少计算量,经常需要添加前面所建立的矿体实体图形来约束插值范围,此外,在三维环境中,对影响范围的样品搜索经常采用搜索椭球体来定义搜索参数,一般包括走向、倾伏角、倾角、各向异性比率参数(主、次主,次半轴相互比率)等,可以借鉴矿体实体模型的产状参数。块体模型估值后计算机就可以自动计算其体积和矿产资源的储量并按要求提交储量报告。

3 结论

随着现代勘探技术的进步,矿区信息化水平的提高,使得矿区三维地质建模与可视化技术成为地学信息研究的热点。由于地质体本身是一个非均质、各向异性的不连续三维实体,工程揭露地质信息有限,基于离散钻孔数据的矿区三维地质建模及可视化系统是一项非常复杂的系统工程。文章在 VC++6.0 编程环境下,借助于 OpenGL 图形库,实现了基于钻孔的矿山三维地质建模与可视化的基本功能,探讨了基于钻孔地质数据库进行矿区三维地质建模及可视化的过程。具体表现在:

1) 在实现三维场景缩放、漫游、旋转等基本功能的基础上,编程实现了基于钻孔地质数据库的钻孔三维空间显示、实体模型、块体模型的创建功能;编程实现了地质体空间位置、表面积、体积、矿产储量的计算与查询和三维地质体的任意面剖切功能。

2) 探讨了基于钻孔数据的地质数据库的结构设计,方便钻孔数据的查询,分析和管理,为地质信息的提取提供了有效、灵活的数据准备。

3) 从建模前的数据准备,建模时,剖面的地质解译及实体模型的创建、样品分析及品位块体模型的创建,系统的探讨了基于钻孔数据的三维地质建模与可视化过程。重点探讨了实体建模中地质解译的关键技术及问题分析,块体建模时矿体储量估算技术。

4) 通过完整的矿区三维地质建模及可视化过程研究与实现,形象直观地再现了地质单元的空间展布及其相互关系,为矿区成矿规律的研究和预测提供了有效的技术手段。确保了矿区勘探设计的科学性,减少勘探风险,并将大大地提高矿产勘查的效率。

[参考文献]

[1] 李亦纲,曲国胜,陈建强. 城市钻孔数据地下三维地质建模软件的实现[J]. 地质通报,2005,24(5):470-475.

[2] Houlding S W. 3D Geolscience Modeling-Computer Techniques for Geological Characterization [M]. Berlin Heidelberg: Sprlnger-Verag,1994.

[3] 曾钱帮,何小萍. 三维地质建模的数学模型与显示方法[J]. 工程地质计算机应用,2006,(3):1-8.

[4] 朱良峰,潘 信,吴信才. 三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J]. 岩土力学, 2006,27(5):828-832.

[5] 刘少华,程朋根,陈红华. 三维地质建模及可视化研究[J]. 桂林工学院学报,2003,23(2):154-158.

[6] 左义权,白 云. 三维地质建模研究现状与发展趋势[J]. 河北地质,2006,(2):27-29.

[7] 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏,等. 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[J]. 地质与勘探, 2007,43(2):76-81.

[8] 潘结南,孟召平,甘 莉. 矿山三维地质建模与可视化研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1):16-18.

[9] 方海东,刘义怀,施 斌,等. 三维地质建模及其工程应用[J]. 水文地质工程地质 ,2002 ,(3) :52-55.

[10] 戴碧波,王李管, 贾明涛,等. 三维数字建模技术在某铜矿山中的应用[J]. 地质与勘探,2007,43(3):97-101.

[11] 侯恩科,赵 洲. 三维体元拓扑数据模型的改进与实验[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(4):13-16.

[12] 曾钱帮,刘大安,张菊明,等. 地质工程复杂地质体三维建模与可视化研究[J]. 工程地质计算机应用,2005,(3):29-33.

[13] 王润怀, 李永树, 刘永和,等. 三维地质建模中虚拟钻孔的引入及其确定[J]. 地质与勘探,2007,43 (3):102- 107.

[14] 刘少华,罗小龙,何幼斌,等. 基于 Delauany 三角网的泰森多边形生成算法研究[J]. 长江大学学报, 2007, 4(1):100-103.

[15] 刘少华, 程朋根,罗小龙,等. 地层三维建模及 OpenGL 下三维可视化研究[J]. 矿业研究与开发, 2006,26(4):58-60.

[16] 吴立新,陈学习,车德福,等. 一种基于 GTP 的地下真 3D 集成表达的实体模型[J]. 武汉大学学报,2007,32(4):331-335.

[17] 周智勇,陈建宏,周科平. SurpacVision 软件在矿床建模中的应用[J]. 矿业工程,2004,2(4):56-58.

[18] 潘 冬,李向东. 基于 Surpac 的矿山三维地质模型开发[J]. 采矿技术, 2006,6(3):499-501.

3D Geological Modeling and Visualization Process of Mines Based on Borehole Data

XIANG Zhong-lin[1,2], WANG Yan[1], WANG Run-huai[1], LIU Yu-fang[1], LIU Shun-xi[1]

(1. *Institute of Resources and Environment*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 45400;

2. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083)

Abstract:3D geological modeling and visualization of mines is the important part of "Digital Mine", and also a research hotspot on the computerization of modern mines. General process of 3D geological modeling and visualization of mines is discussed based on borehole data from its concept, including establishment of geological database, solid model creation and grade block modeling. Important methods and techniques used in geological database design, geological interpretation and ore body reserves estimation are particularly investigated. Based on OpenGL library, 3D geological modeling and visualization of mines is achieved in VC#6.0. This achievement provides a reference for designing of 3D geological modeling and visualization software, and promotes informatization construction in mines.

Key words:3D geological modeling, visualization, mine, borehole data, reserves estimation