维普资讯 http://www.cqvip.com

技术·方法

三维GIS技术在固体矿产勘探和开发中的研究与应用

吴健生[1]，朱谷昌[2]，曾新平[3]，张普斌[2]，和志军[3]
（1. 北京大学城环系，北京 100871；2. 有色金属矿产地质调查中心，北京 100814；
3. 中国地质大学，北京 100083）

[摘 要]矿业三维GIS是地质矿业信息化的研究重点和热点，是科学计算可视化在地质上的应用，它涵盖地质体的三维可视化、体空间插值等领域。矿业三维GIS软件一般包括空间数据库的建立、三维体的创建和编辑、地统计学分析和预测、地质测绘、露天和地下开采设计、矿山生产计划调度等功能，在理论上应用于矿床模式分析、成矿预测，完善三维GIS的理论和功能；实践中应用于地质勘查、储量计算、经济评价、采矿设计和矿山的生产管理各阶段。

[关键词]三维GIS 可视化 地质勘探
[中图分类号]P628 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2004)01-0068-05

随着地质和矿业的产业化，当今地质、矿业界人士希望能够更直观、更精确圈定矿体边界，了解地下地质体（包括地层、断层、褶皱构造等）的三维形态，准确地解译和圈定地下地质体，以便指导矿业开发和深部找矿预测。这就必须利用三维可视化建模技术。地下三维可视化技术是真三维地理信息系统的一个分支，它在可视化技术的支持下揭示地下地质体的特性；它充分利用了真三维地理信息系统（3D-GIS）技术，以可视化技术为基础，以地学问题为核心，将地质上的逻辑思维和空间上的形象思维有机地结合起来，通过信息的动态反馈来获取矿体空间形态变化和品位变化等地质规律。

1 科学计算可视化与GIS可视化

科学计算可视化（Visualization in Scientific Computing）是发达国家20世纪80年代后期提出并发展起来的一个新的研究领域。1987年2月，美国国家科学基金会在华盛顿召开了科学可视化的首次会议，指出“科学家们不仅需要分析由计算机得出的计算数据，而且需要了解在计算过程中数据的变化，而这些都需要借助于计算机图形学及图像处理技术”。会议将这一涉及到多个学科的领域定名为“Visualization in Scientific Computing”，简称“Scientific Visualization”。科学计算可视化的应用领域十分广泛，几乎涉及自然科学及工程技术的各个方面。主要应用在医学、地质勘探、气象学、分子模型构造、计算流体力学、有限元分析、空间探测、天体物理、数学等领域。

GIS可视化是科学计算可视化与地球科学结合而形成的关于地学数据的视觉表达与分析。60年代发展起来的基于计算机的地理信息系统开始形成时，就利用计算机图形软硬件技术，进行地理空间数据的图形显示与分析研究，但GIS可视化早期受限于计算机二维图形软硬件显示技术的功能，大量的研究还只放在图形显示的算法上，如画线、颜色设计、选择符号填充、图形打印等功能的算法实现。继二维GIS可视化研究后，进一步发展为对地学等值面（如数字高程模型）的三维图形显示技术的研究，利用三维到二维的坐标转换、隐藏线、面消除、阴影处理、光照模型等技术，把三维空间数据投影显示在二维屏幕上，它对地学数据场的表达是二维的，而不是真三维实体空间关系的描述，因此属于2.5维可视化。但现实世界是一个真三维空间，二维GIS无法表达诸如地质体、矿山、海洋、大气等地学真三维

[收稿日期]2003-04-11；[修订日期]2003-05-20；[责任编辑]曲丽莉。
[基金项目] 国家“十·五”科技攻关项目课题（编号：2001BA609A-04）资助。
[第一作者简介]吴健生（1965年-），男，2001年毕业于中国科学院地理研究所，获博士学位，现为博士后，高级工程师，主要从事遥感和GIS的研究和应用工作。

维普资讯 http://www.cqvip.com

数据场,所以,从20世纪80年代以来,真三维GIS及体可视化成为GIS的研究热点。

2 国内外地质体三维可视化研究和应用现状

在地质体三维可视化基础理论研究方面,国内外学者已经完成了大量的基础性研究。

Bak(1989)、Smith(1989)提出了地学信息的三维表示方法[1,2],Raper(1989)提出了一些地学三维模型[3],Fritsch(1990)阐述了三维GIS数据结构[4],而在Simon W Houlding阐述的地质三维GIS的系统理论中[5,6],他详细地阐述了实现地下三维可视化技术的一些基本方法,包括空间数据库的建立、三角网生成方法、三角网面模型构建方法、地质体边界的圈定和连接、储量计算方法、采矿设计等诸多方面,基本上囊括了当前地下三维可视化技术的核心理论。

我国也有不少学者在进行三维可视化技术研究,但成熟技术多集中在地形三维可视化方面,如李德仁、徐青、朱庆等进行的研究工作[7~9];而中国矿业大学吴立新、武汉地质大学吴冲龙、北京科技大学侯景儒、北京大学遥感所刘燕君、毛善君等进行了地下三维可视化技术的框架研究[10~14];并且有部分学者在地下三维可视建模及三维设计造型等具体技术方面做了大量的研究开发,如曹代勇、王峰等利用openGL研究三维地质模型可视化[15];芮小平等(2001)提出构建三维GIS的思路[16];李青元等(2000)讨论了单一体划分下的三维GIS矢量结构概念模型和拓扑关系[17],夏炎(1997)提出三维空间数据结构—多面体编码方案[18]。国内的专家侧重于三维数据模型和数据结构的研究。

随着计算机性价比的提高和三维可视化技术的完善,国内外地质矿业界开始在生产领域采用三维可视化技术,以便提高企业的效益。

西方地质矿业界在20世纪70年代初就将CAD技术应用于地质、矿业领域。早期的采矿计算机辅助设计(采矿CAD设计)阶段是地下三维可视化技术的萌芽和蕴育阶段;之后,随着计算机技术的不断更新和CAD技术进步,矿山CAD技术也不断吸取先进技术,在矿业中的应用领域也不断得到扩展;80年代末图像仿真技术和3D-GIS技术的发展,推动了地下三维可视化技术发展,一大批CAD系统软件、地质采矿软件被开发应用。现今世界上有数家知名地质采矿软件公司相继开发了地下三维可视化方面的软件,如加拿大Gemcom公司的Gemcom;澳大利亚Surpac国际软件公司(SSI)的Surpac;澳大利亚Maptek公司的Vulcan;英国MICL公司的DataMine & Guide;澳大利亚Micromine公司的Micromine;加拿大LYNX GEOSYSTEMS公司的LYNX与MicroLYNX +;还有其它的如Metech、EarthVision、Medsystem、Autocad、Microstation和Minecom等三维可视化地质软件。

目前,国内有中国矿业大学、西安煤炭设计院、北京科技大学、中南大学、东北大学等院所及有色金属矿产地质调查中心、江西铜业公司、山西安太堡煤矿、陕西八卦庙金矿等开展该项研究和应用,通过引进国外先进的软件技术进行生产管理,同时进行二次开发,已出现了很多有价值的开发产品,在理论和技术上达到较先进的水平。大多数工业部门把三维可视化软件应用于科研项目和生产,而且许多国内软件公司已经开发出自主版权的三维可视化软件,如适普软件公司利用IDL开发出来的IMAGIS三维可视地理信息系统、东方泰坦的TitanVRMap和TITAN 3DM、武汉地质大学的Geoview等软件系统。这些软件已经初步具有地质体三维可视化的功能,但要商品化还需要功能进一步完善和一个标准化的过程。

3 地质勘探中三维可视化软件的基本功能

地质勘探中使用多种手段,以便从不同的角度探测矿体的特征,这些方法涵盖地质、测量、地球物理、地球化学等诸多领域,得到各种类型的数据,因此,地质勘探中的三维可视化软件应该具有处理上述领域数据的功能,为地质学家、采矿工程师、矿山测绘人员和高级管理人员服务。

通过对国外知名的11个地质体三维可视化商品化软件的功能分析[19],对其应用目的、功能和主要系统模块概述如下:

1)主要目的是为地质和矿业开发的各个环节服务:(1)存储和管理地质勘查数据,包括地质、地球物理、地球化学、钻孔数据等,建立地质勘探数据库,进行矿床品位和质量分析,矿山开发和规划制图,坑道和地下测绘。(2)地质模型的分析和建立,矿产储量的统计分析。(3)开采设计方案的确定,根据矿体的经济评价来设计科学可行的生产方案。(4)长、中和短期矿产开发计划,包括生产计划和进度的规划控制、品位控制和测绘管理。

2)主要功能包括:(1)数据的输入——钻孔数据、采样数据、物探数据、化探数据及地形数据的输

维普资讯 http://www.cqvip.com

入、编辑和差错性检查。(2)数据库管理——管理相应的空间数据和属性数据。(3)钻孔数据的剖面和平面图形显示和绘制。(4)剖面和中段面的地质解译,进行矿体边界的圈定,矿体三维模型的生成。(5)表面模型的定义和生成及体积计算。(6)品位的统计分析,以确定品位分布和变化特征。(7)地质统计分析,利用品位分布的 SEMI - VARIOGRAM 模型进行矿石品位估算。(8)矿产储量模型的定义、编辑、显示和绘图。(9)可采储量的数据库管理。(10)断面和平面的模型显示以进行辅助开采设计和规划。(11)根据矿化的自然特性、工程环境和条件,设计开采范围和边界。(12)矿山开采生产规划和生产流程的设计。(13)短期生产计划,根据采掘进度进行矿山储量平衡表的计算和报表输出。(14)利用采掘过程中搜集的数据进行生产控制,设计矿山的采矿配矿计划。(15)根据矿山采掘和生产中获得的实际品位数据来调整和更新储量模型。以便储量模型更加吻合矿山实际情况。

3)主要模块一般包括:(1)三维地学数据结构、数据模型和数据管理模块:如管理孔(Hole)数据(如钻孔、测井记录)、地图数据(mapdata)、表面数据(TIN Surface)、体数据(Volume)和三维格网数据(3D grid)。(2)三维图形交互编辑模块:如点、文字、线、多边形的创建、复制、移动、旋转、放大、缩小、恢复、隐藏、半隐藏、可视。(3)三维地质模型模块:提供对复杂的地下条件和情况进行三维描述和观察分析所需的全部功能:如三维地质解译、视平面切分、背景显示、地质实体边界的三维交互解译、TIN 表面模型和制图、等值面生成、半透明显示、光源设定、表面纹理、高级制图和三维色彩等值线的绘制等。(4)三维地学统计功能模块:先进的三维地质统计分析和预测技术,包括用于处理地质、地球物理、地球化学数据和对这些数据进行非正态分布调整的综合功能,进行数据趋势分析和复杂的空间关系分析:如算术、对数和三角函数运算、均值、方差等基本统计功能、频率、直方图分析、可能性分析、相关分析、Semi - variogram 分析、数据分析、三维 Kriging 预测、三维反向权重距离、不确定的预测、地质、方向和空间数据控制。(5)三维网格(3D Grid)操作和分析模块:如简单体描述、体的切分和切面分析、等面体的描述、复杂体的描述、采样控制、不确定性和危险性分析、可能性估计。(6)三维地质/地下工程设计模块,提供了交互设计、地面设施建设、地下工程开掘、地下工程结构分析设计的强大功能平台:如视平面切分、背景显示、表面模型工具、三维 TIN 表面模型、工程表面模型、挖掘体模型、抛面定义、锥形体挖掘观察设计、交互的抛面编辑、交互定义和编辑开掘抛面、支持开掘和填充设计、斜坡和护道控制、延中心线自动生成地下三维实体、基于中心体的设计工具(包括设计涵洞、坡道和其他地下工程)。(7)采矿设计,包括地下开采设计和露天采矿设计模块:延中心线自动生成地下实体、矿中和巷道设计、开发设计、CAD 工具、抛面设计、矿井的掘进管理、露天矿的设计和规划、工程表面管理、开挖体模型、交互的三维编辑、实体切断面、三维透视显示、锥体开挖设计、爆破钻孔设计和级别控制。(8)测绘模块:GPS 数据的自动接收、DTM 的生成。

4 地质三维可视化的应用领域

固体矿产的地质勘探是一个长时间的研究和生产过程,涵盖了地球物理、地球化学、成矿预测等诸多领域,一般要经过成矿研究、地质普查、详查勘探等过程。地质三维可视化可以应用于整个过程,尤其是可延伸至矿山开发、管理等阶段。

4.1 成矿分析、地质普查阶段

随着地质勘探工作的深入,地表的矿产资源一般都已经发现,故现在的地质勘探是寻找地下盲矿体,它埋藏于地下一定深度内,这类矿产的成矿预测必须利用反映地下矿体的多种资料,包括地层、岩性、构造、地球物理、地球化学资料,对这些资料进行综合分析,进行成矿预测。以往的成矿预测研究方法是研究者在纸面上对各种资料进行分析,现在三维可视化技术为成矿预测综合分析提供了一个平台,可以在三度空间中分析各种资料及其异常特征,对这些资料进行叠加运算、缓冲区分析等,寻找它们与成矿的关系,建立成矿模型,更好地进行成矿预测。在对所有的地质、地球物理和地球化学数据分析的基础上,寻找对成矿最有利的地段,布置普查钻孔,设计普查钻孔的位置、深度,提高普查钻孔的见矿概率,以便节约勘探资金,根据钻孔的见矿概率来提高对矿体成矿规律的认识,更好地进行成矿分析。如笔者近几年应用澳大利亚 maptek 公司的 Vulcan 软件对铅锌矿体进行三维可视建模,直观明了地展示地下铅锌矿二、三维形态,为研究矿体的空间展布规律提供了科学依据。

4.2 勘探阶段

勘探两个主要问题一是合理地布置钻孔,减少勘探成本,二是建立钻探数据库,合理地进行地质解

维普资讯 http://www.cqvip.com

释,圈定矿体,进行储量计算,提交高级别的储量。

在以往许多地质勘探过程中,常常存在两种情况,一是由于钻孔布置过密,导致勘探成本加大,施工期延长;二是刚好相反,钻孔布置过稀,导致钻探工程不能完全控制矿体,影响提交储量的级别,需要补充勘探,延长施工期。在三维矿山GIS中,对这种矛盾的解决是利用普查阶段得到的普查工程数据,建立矿体的粗略的三维模型,把矿体分成矿房大小的小块,应用品位估算方法粗略估算各小块的品位,由于工程数量较少,将会有许多小块没有工程控制,不能进行品位估算,只有在这些部位补充布置钻孔才能得到完整的品位估算结果,这种利用矿业三维GIS进行详查阶段的钻孔优化布置方法既经济又高效。

在钻探施工过程中,利用三维矿山GIS采集勘探数据,包括钻孔、浅井和竖井、探槽、坑道编录数据、地质测量的数据、地层记录数据、岩矿分析化验数据、物探化探测量数据、地震测量的数据以及其它探测和调查数据,建立矿区勘探数据库;在三维可视化环境下进行地质解释、矿体边界的圈定,实现地质体的三维重建和可视化,建立复杂而又不规则的地质体三维模型,应用地统计方法进行矿体储量计算,得到矿体的品位分布规律和储量。如澳大利亚普莱塞尔公司在陕西八卦庙金矿的补充勘探是在澳大利亚surpac软件的指导下完成,取得了满意的效果。

4.3 经济评价阶段

在矿山三维GIS中,矿体的品位模型是基于矿房的模型,并且矿房的尺寸可以根据需要改变。由于每一个矿房都有品位,整个矿体的矿石量、金属量也容易计算,这样,对矿体的经济评价就变得比较容易。同时,随着市场情况的变化,可以改变矿体的边界品位,重新圈定矿体,重新计算矿体的平均品位、矿石量、金属量,进行不同市场情况下的矿山经济评价。

4.4 采矿设计阶段

国内常用的采矿设计一般是基于CAD的设计,CAD软件可以对均匀材质的实体和相对规则的三维实体建模,而对于矿体这样复杂、多变的实体,根本无法表达和操作。随着矿山三维GIS的功能完善,复杂矿体的三维模型的建立在技术上成为可行,这样真正进行地下三维可视化设计也成为可能。可视化采矿设计就是应用三维实体模型技术,建立矿山的数字模型,在三维数字化模型的基础上完成采矿工程布置、方案优化、进度计划编制等采矿设计。顾名思义,可视化采矿设计就是在采矿设计或生产过程中,能即时看到设计对象的结果和效果,实时交互地修改设计对象。并且可以实时验证设计的合理性和正确性,迅速得到满意的结果。而不象以往传统的设计程序那样需要很多的人力、专家花很多的时间和精力去检查设计结果或计划的正确性和合理性,而且不能定论设计方案或计划方案是否最优。在利用可视化采矿设计进行设计时,检查(或审检)人员可以节省大量的时间和精力不去检查那些繁杂的对象关系及细节,因为所有的对象或工程都清清楚楚地跃于眼前,细节及相互间的关系也一目了然。设计人员可以把主要精力用在整个系统的合理性和最优性的分析上,也就是说,只考虑关键的属性、参数,如果它们合理、正确,则结果是正确,而无需质疑细节和误差。这样大大地提高了设计产品的质量、水准及速度,减少了设计上的失误和错误,避免了大量的重复设计和修改的工作量。

4.5 矿山的生产管理

在矿山采矿过程中,出矿品位是最主要的参数,也是采矿生产计划所关心的主要参数,它关系到矿山的生产配矿,在矿山三维GIS中,已经估算了每一个矿房的品位,而且该品位的估算精度将随着矿山开采的进展,矿体模型的完善而越来越高,因此生产计划中将要开采的任何位置的矿石品位、矿石量、金属量可以直接从计算机中得到,矿山管理人员可以根据将要开采的矿石品位等特征来计划矿山采矿配矿的工作。如中国江西铜业公司应用三维可视化软件进行矿山采矿配矿管理,取得了很好的效益。

5 展 望

随着地质和矿业界对矿体的边界、品位的准确性要求越来越高,许多科研机构正在为更好地满足企业的要求而开展矿体三维可视化的理论研究,并且主要侧重于地质概念模型的建立、三维数据模型和三维数据结构等方面,可以看到以上领域将取得理论上的突破。

在信息技术高速发展的今天,几乎使所有的企业都进入全球化市场竞争环境中,企业为了扩大优势,增强竞争力,以适应全球化经营策略,不得不调整企业结构。而对于矿业行业如何面对全球经济的浪潮,如何挖掘自己的优势,增强生存能力和竞争能力,如何溶入这股浪潮中而不被淘汰,最关键的问题除了加强管理,提高管理水平以外,就是要提高企业的高技术水平,矿山三维GIS就是矿业企业中可以

维普资讯 http://www.cqvip.com

应用的最基础的高新技术，它能降低企业的经营成本和经营风险，提高企业的竞争力，使矿业企业的许多生产活动基于科学的管理和控制之下，使企业的生产、决策有科学性，因此将会有越来越多的企业应用矿业三维 GIS。

需求是技术发展的原动力，矿业三维 GIS 将在社会需求的推动下，在理论和应用上进入一个新的台阶。同时，根据笔者应用 Vulcan 软件进行新疆阿舍勒铜锌矿区、云南曼家寨锡多金属矿区的三维可视化应用效果来看，地质三维 GIS 能解决地质矿产行业中的许多基础问题。同时，地质三维 GIS 开始应用于地质灾害、城市地质等领域，相信不久的将来，越来越多的领域将应用地质三维 GIS。

[参考文献]

[1] Bak P, mill A Representation in a geo - scientific resource management system for the minerals industry[A]. Three dimensional application in geographical information systems[C]. 1989, 3(1): 15 ~ 31.

[2] Smith D R, Paradis A R . Three - dimensional GIS for the earth sciences[A]. In proceedings of 9th international Symposium on computer - assisted cartography[C]. 1989, 324 ~ 325.

[3] Raper J F. The 3 - dimensional geo - scientific mapping and modeling systems: a conceptual design[M]. London: Taylor&francis. 1989, 11 ~ 19.

[4] Fritsch D. Towards three - dimensional data structures in Geographic Information Systems[A]. Utrecht: EGIS Foundation[C]. 1990, 335 ~ 345.

[5] Simon W. Houlding. 3D geoscience modeling - computer techniques for geological characterization[M]. Springer - Verlag, New York and Heidelburg, 1994.

[6] Simon W. Houlding. Practical geostatistics, modeling and spatial analysis[M]. New York and Heidelburg, Springer - Verlag, 2000.

[7] 李德仁. 信息高速公路、空间数据基础设施与数字地球[J]. 测绘学报. 1999, 28(1): 1 ~ 5.

[8] 徐 青. 地形三维可视化技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2000.

[9] 朱 庆. 三维动态交互式可视化模型——地理信息系统中的三维表示与分析[J]. 武汉测绘科技大学学报. 1998, 23(2): 124 ~ 127.

[10] 吴立新, 张瑞新, 戚宜欣, 等. 3 维地学模拟与虚拟矿山系统[J]. 测绘学报. 2002, 31(1): 28 ~ 33.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 刘燕君. 多元真三维系统在导油气构造研究中的应用[J]. 遥感技术与应用. 1997, 12(2): 32 ~ 38.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 李青元, 林宗坚. 真三维 GIS 技术研究的现状与发展[J]. 测绘科学, 25, (2): 2000.

[18] 夏 炎. 三维矢量结构地质模型及其微机可视化图形显示系统研究[D]. 中国矿业大学北京研究生部博士学位论文, 1997.

[19] www. surpac. com、www. vulcan3d. com、www. datamine. co. uk、www. micromine. com. au、www. metech. com. au、www. gemcom. bc. ca、www. dgi. com、www. minecom. com、www. ecs. com. au、www. sat. com. au、www. lynxmining. com. au[DB/oL].

THE RESEARCH AND APPLICATION OF 3D - GIS IN SOLID MINERAL EXPLORATION AND MINING

WU Jian - sheng[1], ZHU Gu - chang[2], ZENG Xin - ping[3], ZHANG Pu - bin[2], HE Zhi - jun[3]

(1. *Peking University, Beijing* 100871; 2. *Geology Investigation Center of Nonferrous Metal, Beijing* 100814; 3. *China University of Geosciences, Beijing* 100083)

Abstract: 3D - GIS used in mining industry is a hot and key point for geological information. 3D - GIS, covered visualization and interpolation of geological body, can be applied in visualization of geology. 3D - GIS software of mining industry has functions of database building, body creating and editing, geostatistical analyzing, serving, mine designing and schedule, and can be used in mineral exploration, resource estimation, economical evaluation, mine design and management.

Key words: 3D - GIS, visualization, geological exploration