

非层状矿体空间构模 与数据存储关键技术研究

Research on Key Technologies of Spatial Modeling
and Data Storage of Non-stratified Orebody

刘亚静 米雪玉 陈光 姚纪明 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

河北省钢铁联合基金 (D2014209253) 和河北省自然科学基金 (D2009)

非层状矿体空间构模 与数据存储关键技术研究

Research on Key Technologies of Spatial Modeling
and Data Storage of Non-stratified Orebody

刘亚静 米雪玉 陈光 姚纪明 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

非层状矿体空间构模与数据存储关键技术研究/刘亚静等著. —武汉:
武汉大学出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-307-13653-3

I. 非… II. 刘… III. ①矿体—系统建模—研究 ②矿体—数据管理—研究 IV. P613-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 144979 号

责任编辑:鲍 玲

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北睿智印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 13.75 字数: 216 千字 插页: 1

版次: 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-13653-3 定价: 30.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

三维地质建模与可视化是实现“数字地球”计划亟待研究和解决的关键技术问题之一,非层状矿体三维建模是三维地质体建模的重要分支。由于非层状矿体地质形态的多样性、复杂性和实际信息的匮乏,很难用规则的几何体来描述,地矿工作者无法准确地判断矿体的三维空间几何形态,确定矿体各个部分的品位、质量分布情况,导致了在计算矿产储量方面精度不高。为此,需要一种灵活、简便、快速的理论和方法来建立非层状矿体的不规则模型。我国许多高校和科研院所所在地质体三维建模方面作了大量的研究,开发出了一些面向矿山的建模可视化原型系统,这些系统无论是从理论上还是从技术上都尚与国外著名矿山专业软件如 Vulcan, MineScape, Surpac, Datamine 等有相当大的差距,其功能和性能都有待于进一步完善和提高。笔者认为造成这种现状的主要原因是:①国内矿山生产单位,尤其是中小型矿山企业的信息化程度低,仍然以手工二维绘图为主,国外三维软件不太适合于国内普遍的生产方式的要求;②国内面向矿山的三维数据建模理论研究尚未实用化,在非层状矿体三维建模方法上还没有突破,主要是类似国外软件的实体模型和块段模型的真三维混合建模理论研究尚未实用化,导致了不能比较精确地计算矿体的储量;③另外,目前国内外对于三维非层状矿体数据模型的数据存储问题也鲜见论述。从实践意义上讲,对矿体进行真三维建模是非层状矿床开拓生产过程中信息化管理的重点和难点,是矿山发展的迫切要求,从理论意义上讲,是地学三维建模的一个重要分支,同时也是三维 GIS 的一个发展方向。

在前人研究成果的基础上,针对存在的问题和缺陷,重点对以下几个方面进行了探索和研究,并得到初步验证:

①基于矢量-栅格一体化数据模型思想,提出了 Solid-Volume-Analogical Right Triangular Prism (ARTP),简称 SVA 一体化数据模型,设计其相应的概念模型和逻辑模型。针对利用体元建模出现的占用内存过大问题,提出了从减少数据量和减少数据信息量两个方面入手来对矿体模型进行压缩存储。

②根据地质勘探数据和地质统计学理论,对二维克里格插值算法进行拓展,利用三维克里格插值算法对块段模型的品位进行插值,建立非层状矿体块段模型,研究块段模型的任意剖面的实现方法,以有效进行非层状矿体模型的剖切;并应用立体几何计算公式对矿体的体积与储量进行相对较精确的计算。

③利用表面-体元一体化数据模型建立非层状矿体整体模型,建模过程中充分考虑了对应性、镶嵌、分支以及矿体尖灭、勘探线不平行等问题;采用立体几何的方法来对矿体边界不规则体元体积和储量进行计算。

④利用改进的十进制 Morton 编码方法来对非层状矿体的多分辨率扩展八叉树模型进行编码存储。为了节省矿体模型的存储空间、加快存储和搜索速度,在前人研究的基础上,综合多分辨率八叉树和扩展八叉树模型的优点,采用多分辨率扩展八叉树数据模型进行数据的压缩存储。

⑤利用 SQL Server 作为后台的数据库,VC++和 OpenGL 作为前台开发语言,在北京龙软科技发展有限公司产品——非层状矿床地测空间管理信息系统的基础上,设计并开发一个具有数据采集、处理、矿体建模、压缩存储、矿体三维显示、矿产储量计算等功能的非层状矿体三维信息处理与可视化原型系统。

全书共分为 6 个章节,第 1 章为绪论,阐述了非层状矿体建模的必要性;第 2 章提出了非层状矿体模型的特征,提出了适合非层状矿体建模的一种新的一体化三维数据模型以及相应的数据压缩算法。第 3 章介绍了建立非层状矿体块段模型的关键技术和主要方法。第 4 章阐述了实体模型建立矿体表面模型的原理,为建立复杂非层状矿体表面模型提出了通过交叉平、剖面轮廓线生成控制线的辅助实体法。若矿体有分支现象时,可利用带辅助线的轮廓分支处理算法予以解决;研究了矿体表面

和块段模型相交的检测原理和求交点的方法，分析了矿体边界不规则体元的体积求算。第 5 章研发了一种多分辨率扩展八叉树矿体存储模型，可比较有效地实现矿体模型信息的合并压缩存储。第 6 章研发了一个三维非层状矿体建模原型系统，并介绍了初步的实际应用。

作 者

2013 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 三维 GIS 概述	1
1.1.1 二维 GIS 向三维 GIS 转变	1
1.1.2 三维 GIS 的定义	1
1.1.3 三维 GIS 的特点	2
1.2 三维空间数据模型分类及其在矿体建模中的应用	3
1.2.1 三维空间数据模型分类	3
1.2.2 三维空间数据模型在矿体建模中的应用	7
1.3 三维可视化原理与关键技术	12
1.3.1 三维可视化原理	13
1.3.2 OpenGL 中创建三维图形的步骤及绘制方式	17
1.3.3 三维几何变换操作	19
1.4 三维数据压缩技术	21
1.5 地矿三维软件	23
1.5.1 国外主要地矿软件	23
1.5.2 国内地矿软件	29
1.6 问题的提出	32
1.7 本章小结	34
第 2 章 非层状矿体空间建模的数据模型与数据结构	35
2.1 非层状矿体数据模型的特征	35
2.1.1 非层状矿体数据模型的基本特征分析	35
2.1.2 非层状矿体建模的影响因素	36
2.2 矿体表面三维空间构模	37

2.2.1 2D 三角网建模	37
2.2.2 实体法建模	38
2.3 基于体元模型的矿体三维空间构模	40
2.3.1 规则体元的矿体建模方法	40
2.3.2 不规则体元的矿体建模方法	42
2.4 基于表面-体元一体化数据模型非层状矿体空间构模	48
2.4.1 SVA 模型的提出	48
2.4.2 基于 SVA 数据模型的矿体构模	53
2.4.3 SVA 一体化数据模型的优点	57
2.5 SVA 数据模型的存储	57
2.5.1 SVA 一体化数据模型的数据结构	57
2.5.2 SVA 一体化数据模型的压缩存储	61
2.6 本章小结	63
第3章 非层状矿体块段插值建模关键技术	64
3.1 三维空间数据插值方法	64
3.1.1 传统插值方法	65
3.1.2 地质统计学插值方法研究背景	66
3.1.3 地质统计学克里格插值方法的优点	68
3.2 地质统计学理论基础	69
3.2.1 地质统计学概述	69
3.2.2 区域化变量的特性	69
3.2.3 变差函数的确定	70
3.2.4 克里格插值	77
3.2.5 最优性检验	79
3.3 三维矿体块段克里格插值的步骤	80
3.4 建立矿体块段插值模型的关键步骤	82
3.4.1 钻孔样品数据离散化	82
3.4.2 搜索邻域点集算法	84
3.4.3 普通克里格矿体块段插值步骤	86
3.5 矿体内部块段模型的剖切和储量计算	87
3.5.1 矿体块段模型的剖切	88

3.5.2 矿体内部规则体元体积的计算	90
3.6 本章小结	91
第4章 表面-体元一体化非层状矿体建模关键技术	92
4.1 实体模型建立矿体表面模型的优点	92
4.2 基于剖面线建立矿体表面模型	94
4.2.1 多边形凸凹判断	94
4.2.2 平行轮廓线连接的基本原理	95
4.2.3 过中心点自动作辅助线法	98
4.2.4 实体模型建立矿体表面模型原理	98
4.3 利用改进的实体模型建立矿体表面模型	100
4.3.1 交叉平、剖面轮廓线建立控制线	102
4.3.2 带辅助线分支处理算法	103
4.4 表面-体元模型一体化建立矿体模型	104
4.4.1 相交检测规则	104
4.4.2 三角形和体元的关系	105
4.4.3 粗略相交检测	106
4.4.4 精确相交检测	107
4.4.5 ARTP 体元剖分矿体边界不规则块段体元	109
4.5 不规则体元体积的计算	113
4.6 本章小结	114
第5章 表面-体元一体化非层状矿体数据模型的压缩存储	115
5.1 传统八叉树模型	115
5.2 三维数据编码方法	116
5.2.1 普通八叉树编码	116
5.2.2 线性八叉树编码和解码	117
5.2.3 深度优先编码	119
5.2.4 三维行程编码	119
5.2.5 十进制 Morton 编码方法	120
5.2.6 改进的十进制 Morton 压缩算法	123
5.3 多分辨率扩展八叉树模型	125

5.3.1 扩展八叉树的建模方法	125
5.3.2 扩展八叉树的特点	126
5.3.3 多分辨率八叉树	127
5.3.4 多分辨率扩展八叉树的数据结构	127
5.4 八叉树的数据合并压缩存储	129
5.4.1 传统八叉树数据合并过程	130
5.4.2 多分辨率八叉树数据合并过程	130
5.4.3 多分辨率扩展八叉树数据合并过程	131
5.5 多分辨率扩展八叉树的矿体模型存储	132
5.5.1 矿体模型向多分辨率扩展八叉树模型的转化	132
5.5.2 实例分析	134
5.6 本章小结	134
第6章 系统开发与应用	136
6.1 系统的需求分析	136
6.1.1 系统的生产现状分析	136
6.1.2 系统的功能需求分析	137
6.1.3 系统的服务对象分析	138
6.2 系统的初步设计思路	139
6.2.1 2DGIS 和 3DGIS 数据一体化	139
6.2.2 三维系统设计组件化	140
6.2.3 三维数据显示符号化	141
6.2.4 三维数据组织对象化	142
6.3 系统的总体设计	145
6.3.1 系统的技术路线设计	145
6.3.2 系统的总体结构设计	146
6.3.3 系统的图例库设计	148
6.3.4 系统的可视化交互管理设计	150
6.3.5 基础运算库	150
6.3.6 空间数据库引擎	152
6.4 系统的数据流程设计	155
6.5 系统功能模块详细设计	158

6.6 地质数据库特点	166
6.7 地质数据库表结构设计	167
6.8 系统功能模块设计	170
6.8.1 空间数据库地测数据管理子系统	170
6.8.2 二维图形子系统	171
6.8.3 矿体三维建模可视化系统	173
6.9 系统的特点	177
6.10 系统在某铁矿的应用	178
6.10.1 矿体的赋存情况	178
6.10.2 矿体模型的建立	178
6.10.3 模型体积和储量计算	185
6.11 本章小结	186
参考文献	187

第1章 绪 论

1.1 三维 GIS 概述

1.1.1 二维 GIS 向三维 GIS 转变

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 作为信息处理技术的一种, 是以计算机技术为依托, 以具有空间内涵的地理数据为处理对象, 运用系统工程和信息科学的理论, 采集、存储、显示、处理、分析、输出地理信息的计算机系统, 为规划、管理和决策提供信息来源和技术支持。

二维 GIS 将平面坐标 (X, Y) 作为独立的参数来表达地物的属性, 数学表示为 $F=f(x, y)$, 是将现实地理空间的地物和地理现象投影到二维平面上, 利用 0、1、2 维空间要素进行表达。二维 GIS 在空间数据的采集、输入、编辑、存储、管理、查询、分析、输出等方面表现出了强大的功能, 但其本质上是基于抽象符号的系统, 不能给人以自然界的原本感受。人们对地理空间的认识是源于现实的三维地理空间, 三维 GIS 可以使人们更加准确真实地认识、感受客观世界, 弥补了二维 GIS 对空间数据表达的缺陷, 但是不可否认的是, 随着二维 GIS 数据模型与数据结构理论和技术的日趋成熟, 图形学理论、数据库理论技术及其他相关计算机技术的进一步发展, 加上应用需求的强烈推动, 三维 GIS 的大力研究和加速发展现已成为可能。

1.1.2 三维 GIS 的定义

从不同的角度出发, GIS 有三种定义: ①基于工具箱的定义, 认为 GIS 是一个从现实世界采集、存储、转换、显示空间数据的工具集合;

②数据库定义,认为GIS是一个数据库系统,在数据库里的大多数数据能被索引和操作,以回答各种各样的问题;③基于组织机构的定义,认为GIS是一个功能集合,能够存储、检索、操作和显示地理数据,是一个集数据库、专家和持续经济支持的机构团体和组织结构,提供解决环境问题的各种决策支持。基于工具箱的定义强调对地理数据的各种操作,基于数据库的定义强调用来处理空间数据的数据组织的差异,而基于组织的定义强调机构和人在处理空间信息上的作用,而不是他们需要的工具的作用。

但是,三维GIS所处理的对象从二维到三维的转变,不只是意味着数据量的增大,更重要的是会导致出现很多不同的对象类型和空间关系。因此,三维GIS的研究不是对二维GIS的简单扩展,则其定义也不能只是基于二维GIS定义的简单延伸。目前,国际上对三维GIS的定义,往往是从与二维GIS的区别引申而来,三维GIS是布满整个地理空间的GIS,与传统的基于平面的二维GIS不同,尤其体现在空间位置与拓扑关系的描述及空间分析的伸展方向上。本质上,三维GIS是将3D空间坐标 (x, y, z) 作为独立参数来进行空间实体对象的几何建模,其数学表示为: $F=f(x, y, z)$, Z 与平面坐标 (x, y) 一样,不再像二维GIS一样进行平面的投影而将 Z 作为属性。因而,三维GIS所建立的模型不仅可以实现真3D可视化,还可以进行3D空间分析。由此,我们将三维GIS定义为:将现实世界中获得的三维采样数据进行输入、存储、编辑、查询、空间分析、模拟并辅助决策支持的计算机系统,其空间坐标 (x, y, z) 都参加图形显示的运算,其空间分析是指描述三维空间位置与拓扑关系。三维GIS是从传统二维GIS发展而来的,不仅能够表达空间对象间的平面关系,而且能描述和表达它们之间的垂向关系,并需实现对复杂空间对象的管理以及三维空间的分析和操作。当前许多专家从不同的角度对三维GIS的功能进行了阐述。学术界对三维GIS所具备的功能的定义尚未达成共识,国际上对三维GIS功能也尚无确切定义。

1.1.3 三维GIS的特点

三维GIS的目标是建立一个采集、管理、分析、再现三维空间数据的信息系统。其研究范围涉及数据库、地理信息系统、计算机图形学、

虚拟现实等多门学科领域。相对于二维 GIS 而言, 三维 GIS 具有 3 个显著的特点:

①显著的可视化效果: 三维 GIS 以人们认识地理空间世界的思维方式来展现现实世界, 比二维 GIS 表达的现实世界更加复杂, 效果逼真;

②海量的空间数据: 三维 GIS 应用尤其是不规则地学对象的精确表达通常具有海量空间数据, 这种巨大的数据量要求系统对数据库进行有效的管理, 具有高效的数据存取性;

③复杂的数据结构: 三维空间数据结构是三维空间数据模型的具体实现, 是客观对象在计算机中的底层表达, 是对客观对象进行可视表现的基础。三维 GIS 不是对二维 GIS 的简单扩展, 三维空间中增加了许多新的数据类型, 空间关系变得更加复杂。

1.2 三维空间数据模型分类及其在矿体建模中的应用

1.2.1 三维空间数据模型分类

三维空间数据模型研究是三维 GIS 领域内的研究热点和难点, 也是空间信息可视化的基础, 国内外许多专家学者在此领域做了大量的研究, 在过去的十几年中, 相继提出了 20 多种空间数据模型, 可以划分为 3 类: 面模型、体模型和混合数据模型。比较典型的见表 1.1, 表 1.2: 其中表 1.1 从几何模型的角度对空间构模方法进行了研究, 而表 1.2 从几何模型和模型表现形式两个角度对构模方法进行了划分, 因此显得更细致、科学、有条理。

表 1.1 空间构模方法分类 1

面模型	体模型		混合模型 (Mixed Model)
	规则体元	非规则体元	
不规则三角网 (TIN)	结构实体几何 (CSG)	四面体格网 (TEN)	TIN-CSG 混合
格网 (Grid)	体素 (Voxel)	金字塔 (Pyramid)	TIN-Octree 混合 或 Hybrid 模型

续表			
面模型	体模型		混合模型 (Mixed Model)
	规则体元	非规则体元	
边界表示模型 (B-Rep)	八叉树 (Octree)	三棱柱 (TP)	WireFrame-Block 模型
线框 (Wire Frame) 或 相连切片 (Linked Slices)	针体 (Needle)	地质细胞 (Geocellular)	Octree-TEN 混合
断面序列 (Series Section)	规则块体 (Regular Block)	非规则块体 (Irregular Block)	
断面-三角网混合 (Section-TIN mixed)		实体 (Solid)	
多层 DEMS		3D Voronoi 图	
		广义三棱柱 (GTP)	

表 1.2 空间构模方法分类 2

	基于面表示的模型	基于体表示的模型		基于面体混合表示的数据模型
		规则体元	不规则体元	
矢量	不规则三角网 (TIN) 边界表示 (B-Rep) 线框模型 (Wire Frame) 断面-三角网 (Section-TIN) TIN 形式多层 DEMS 三维形式化数据结构 (3DFDS) 面向对象三维几何目标数据模型 (OO3D) 简化的空间数据模型 (SSM) 三维城市模型 (3DCM)	结构实体几何 (CSG)	四面体格网 (TEN) 似 (类) 三棱柱 (QTPV、GTP) 地质元细胞 (Geocellular) 不规则块体 (Irregular Block) 体模型 (Volume) 3D-Voronoi 图	不规则三角网-结构几何实体 (TIN-CSG)

续表

	基于面表示的模型	基于体表示的模型		基于面体混合表示的数据模型
		规则体元	不规则体元	
栅格	规则格网 (Grid) 形状模型 (Shape) 格网形式多层 DEMS	体素 (Voxel) 八叉树 (Octree) 规则块体 (Regular Block)		
矢量-栅格集成	格网-三角网混合数字高程模型 (Grid-TIN)	针体 (Needle)		八叉树-四面体格网 (Octree-TEN) 线框模型-块 (Wire Frame-Block) 不规则三角网-八叉树 (TIN-Octree)

(1) 面表示的三维数据模型

基于面表示的数据模型侧重于 3D 空间实体的表面表示, 如地形表面、地质层面、构筑物 (建筑物) 及地下工程的轮廓与空间框架, 所模拟的表面可以是封闭的也可以是不封闭的。由于表面建模目的的不同, 可以选择不同的基于面表示的模型。其中, 基于采样点的 TIN 模型和基于数据内插的 Grid 模型适用于非封闭的表面模拟; 而边界模型 (B-Rep) 和线框模型 (Wire-Frame) 适用于封闭模型和外部轮廓模型。Section 和 Section-TIN 混合模型及多层 DEMS 等模型通常适用于地质构模。通过表面表示形成三维空间目标轮廓, 其优点是便于显示和数据更新, 不足之处是由于缺少三维几何描述和内部属性记录而难以进行三维空间查询与分析。

(2) 体表示的三维数据模型

真正意义上的三维可以用于描述矿体边界和内部结构的整体表示, 通常采用体元分割和真三维的实体表达。体元的属性可以独立描述和存储, 因而可以进行三维空间操作和分析, 体元模型可以按照体元的面分为四面体 (Tetrahedral)、六面体 (Hexahedral)、棱柱体 (Prismatic)

和多面体 (Polyhedral) 等类型, 也可以根据体元的规则性分为规则体元和非规则体元两大类。规则体元包括结构实体几何 (Construction Solid Geometry)、体素 (Voxel)、八叉树 (Octree)、针体 (Needle) 和规则块体 (Regular Block) 共 5 种类型, 非规则体元包括四面体格网 (Tetrahedral Network)、金字塔 (Pyramid)、三棱柱 (TP)、地质细胞 (Geocellular)、非规则块体 (Irregular Block)、实体 (Solid)、3D-Voronoi 和 GTP 共 8 种模型。实际应用时应该考虑建模对象的形态与建模要求。当建模对象注重其内部场物质描述时可采用以规则格网单元为体元的模型来表示, 例如水体、污染分布、重力场、磁场和环境等问题的构模, 其中 Voxel、Octree 模型是一种无采样约束的面向场物质 (如重力场、磁场) 的连续空间的标准分割方法。当建模对象需要同时考虑边界约束和内部场物质描述时, 可采用以非规则格网单元为体元的模型来表示, 如不规则块体模型 (Irregular Block)、体模型 (Volume)。当建模对象为规则几何体且仅注重实体形态表示时可用 CSG 等 CAD 模型。当建模对象为不规则几何体并受采样数据约束和需要进行内部场物质描述时, 可采用四面体模型或似三棱柱体模型。

(3) 混合数据模型

面模型的构模方法侧重于三维空间实体的表面表示, 形成三维目标的空间轮廓, 如地形表面、地质层面等, 容易为地层及其构造提供精确的空间描述, 特别是构造复杂地带或岩石断裂处, 其优点是数据量小, 便于显示和更新, 对单个目标操作简单, 三维物体的显示速度快; 不足之处是难于进行空间分析, 算法实现的难度大, 且不能表达体内不均一的特性。基于体模型的构模方法则侧重于实体内部的表达, 如矿体、水体、建筑物等, 通过对体元的描述实现三维空间的表达, 优点是易于进行空间操作和分析, 空间物体的相对位置比较容易确定, 但存储空间大, 计算速度慢, 在一定的分解度下, 所能描述的空间对象的精度有限, 且随着分解率的增加, 数据量迅速增加。在地学领域特别是矿山井下系统中大量的极其不规则的断层、地质体、钻孔、矿体、坑道等在三维描述与显示方面非常复杂, 用一种数据结构难以准确地表示地矿模型, 因此为了既能解释实体内部的不均匀现象, 又能满足拓扑关系分析的要求, 以及进行布尔操作, 国内外的一些学者在这方面做了较多的研究工作, 提出了混合数据结构, 把两种或两种以上的数据模型结合起