

doi:10.3799/dqkx.2010.054

3D 矿床建模技术在数字矿产勘查中的应用

倪平泽^{1,2}, 刘修国^{1,2}, 李超岭³, 李丰丹³

1. 中国地质大学信息工程学院, 湖北武汉 430074

2. 武汉中地数码科技有限公司, 湖北武汉 430074

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

摘要: 为弥补现有数字矿床建模技术在地质矿产勘查处理和应用中的不足, 从原始勘查数据建库及标准化、多指标单工程矿体自动圈定、基于语义识别的剖面矿体的连接与外推、矿体表面和品位建模、基于剖面矿体线框模型构建矿体表面模型及基于 TIN+Octree 数据结构和地质统计学理论建立矿体的空间属性模型等 5 个方面总结提出一套面向地质矿产勘查业务处理的矿床建模流程和总体技术解决方案, 提高了地质矿产勘查研究精度, 为进一步的矿山开采提供可靠的数据模型。

关键词: 数字矿床建模; 自动矿体圈定; 矿体表面与属性建模。

中图分类号: TP311

文章编号: 1000-2383(2010)03-0444-09

收稿日期: 2010-01-15

3D Ore Deposit Modeling and Application in Digital Mineral Survey

NI Ping-ze^{1,2}, LIU Xiu-guo^{1,2}, LI Chao-ling³, LI Feng-dan³

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

2. Wuhan Zondycyber Co., Ltd., Wuhan 430074, China

3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: To make up the deficiencies of existing digital ore deposit modeling methods and its applications in mineral survey data managements, a method is advanced for ore deposit modeling in geological mineral survey data management. The method is featured with the following improvement: (1) Original mineral survey data standard informationization; (2) Automatic engineering orebody delineation by multi-confine and complex industry index; (3) Orebody joint and extrapolate mode in profile map based on semantic identification; (4) Orebody surface modeling by orebody wireframe model contours in profile map; (5) Orebody spatial attribute modeling by TIN+Octree data structure and geostatistics, and its applications in mineral reserve estimation. So that it can enhance research precision on geological mineral survey and provide the credible orebody model for mining design.

Key words: digital ore deposit modeling; automatic orebody delineation; orebody surface and attributes modeling.

随着全球矿产勘查难度的日益增大, 利用新的技术与方法来提高隐伏矿、深部矿和难识别矿的发现率是目前矿产勘查中的主要研究课题之一(赵鹏大, 2002; 王瑞江等, 2008)。运用现代空间信息理论, 将三维矿床建模技术应用到地质矿产勘查研究中, 建立勘查区矿床的三维空间与属性模型, 满足勘查数据综合处理的业务需求, 为矿山地质研究、矿床预测、矿体资源储量估算、后期矿山开采设计提供数字

化及可视化的分析手段, 提高矿产勘查地质研究精度、勘查成果的综合利用效率, 具有重要的研究意义。

1 现有数字矿床建模技术的不足

目前常用的数字矿床建模方法主要关注在具有丰富的地质数据或勘查程度的情况下建立模型的方

法(齐安文等,2001;吴健生等,2004),这种方法在地质矿产勘查应用时有很多不足之处,具体表现为:

(1)数据格式多、建库时间长.矿产勘查涉及地质勘探、基础地质、水文地质、环境地质等多个专业的编录、测量、分析与成果数据.大信息量原始编录数据的快速建库、不同格式之间数据模型的转换和继承都是目前急需解决的问题.

(2)缺少通用的矿体自动化圈定方法.在详查与勘探阶段,工程矿体圈定是一个较为复杂的过程.虽然已有学者进行了相关自动化矿体圈定的研究(徐兵等,2006;陈国旭,2008),但是针对多金属、共生矿床的矿体自动圈定问题一直没有得到很好地解决,同时在剖面矿体连接方面也没有一个通用的自动化解决方法.

(3)矿体空间建模技术应用上的不足.目前国外主流矿业软件均采用轮廓线拼接技术实现矿体和地质体的表面建模(陈爱兵等,2004;黄艳丽等,2007),但是现有的轮廓线拼接算法主要适用于矿体形态为凸多边的情况,针对凹多边形间的拼接算法尚处于理论与探索阶段,同时在矿体面“多对多”拼接时,如何智能的确定矿体分叉点,解决多矿体表面之间的分叉问题也有待进一步的研究(Ekoule *et al.*, 1991; Meyers *et al.*, 1992; 刘修国等,2006).在矿体属性建模方面,基于块体模型的矿体品位分布表示方法已被广泛的接受,但是大数据量下矿体

属性模型的快速生成和可视化仍是需要解决的问题.

本文结合矿产勘查实际业务流程,在现有矿床建模技术基础上,提出了一套更为完善的、面向数字矿产调查业务处理的矿床建模技术方案.该方案实现了通用工程矿体自动化圈定方法,并给出一种针对剖面矿体自动连接与外推模式,应用生成的剖面矿体线框模型构建矿体表面模型,最后基于 TIN+Octree 模型与地质统计学理论对矿体进行表面与属性建模,并对矿体资源储量进行估算.

2 数字矿床建模流程

建立面向矿产地质勘查的数字矿床模型目的是实现矿产资源储量估算及矿产资源调查信息的综合表达,如图 1 所示,整个流程主要由 4 部分组成:(1)建立矿区或勘查区勘探数据库,并完成数据的检查与校正;(2)工程矿体圈定,构建勘探剖面矿体及地质体的边界线;(3)构建矿体三维表面模型,并根据表面模型,构建矿体的空间属性模型;(4)基于地质统计学空间插值理论,对矿体属性模型进行赋值.本文主要从多元数据融合集成、剖面矿体自动化圈定、矿体表面模型构建和矿体空间属性模型构建 4 个主要方面,结合矿产勘查业务,阐述数字矿床建模的过程.

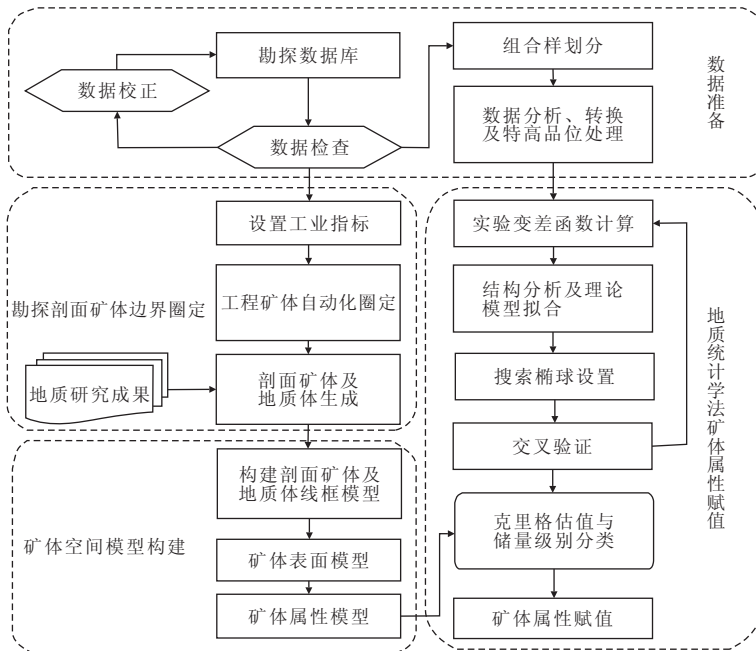


图 1 数字矿床建模基本流程

Fig. 1 Basic implement flow for digital deposit modeling

2.1 多元数据融合与集成

地质矿产勘查涉及地质勘探、基础地质、矿床地质、水文地质、工程地质、环境地质等多个专业的编录、测量、分析与成果数据。数据类型多、信息量大。数据的表现形式主要有：(1)地质图件，如区域地质图、勘查剖面图等，其存储格式主要为 MapGIS、CAD、JPG、TIF 等；(2)表格资料，如钻孔岩芯鉴定表、取样分析结果表等，其存储格式多为 Excel 文件，少数为文本格式；(3)遥感影像和三维物探解译图像；(4)文字，主要是文字报告，以文本和 Word 格式为主；(5)数据库文件，如 Access、DB2、Foxpro、Oracle、SQL Server 等。这些多元异构的数据在编录方法、解译流程、存储手段上都存在较大的差异，必然会形成诸多的信息“孤岛”。因此必须按照国家和行业的相关标准，如国家地质矿产行业标准煤、泥炭地质勘查规范(DZ/T0215-2002)、固体矿产勘查原始地质编录规程(DD 2006-1)、固体矿产勘查地质资料综合整理研究规定(DZ/T0079-1993)、空间与属性数据库建库规范(中国科学院地理科学与资源研究所, 2005)等对数据进行标准化转换，实现数据库的统一存储与集成。

2.2 单工程矿体圈定

工程矿体圈定是构建剖面矿体的基础，自动化的工程矿体圈定流程能够极大地提高工作效率，减少计算错误。针对工程矿体的自动化圈定，已有一些学者做了相关的研究，但基本是适用于一些矿体形态较为简单、勘查程度比较低的矿体圈定情况，仍然无法解决共生矿床、多金属矿床的自动圈定问题，同时也无法在矿体圈定时进行矿石品级的自动划分，而矿石品级划分是详查与勘探阶段矿体圈定主要完成的工作之一。采用基于条件表达式及多矿石品级分类的综合矿体自动圈定的解决方法，将每种矿石品级的圈定条件用条件表达式的方式进行组织，利用程序的自动解析来完成样品所属的矿石类型和矿石品级的判断，最后基于勘探参数、岩石属性等条件来进行自动化的矿体圈定。

2.2.1 数据预处理 在圈矿之前需根据矿床类型和工业指标的要求对样品数据进行预处理。预处理的内容主要包括 3 个方面：(1)生成综合折算元素。有些多元元素矿床品位普遍偏低无法单独利用，因此要根据几种指定元素的品位与折算系数生成新的折算值作为综合指标用于矿体圈定；(2)设置元素特高品位处理方式。样品的风暴值会对矿段品位的统计产生一定的影响，通过设置元素品位的上限来对样品进行约束，如果样品品位高于上限值可进行按上限值替换或剔除等处理；(3)设置统计伴生元素有用金属量时最低品位值。在一些有色金属矿矿体圈定与品位统计中，样品中的伴生金属元素品位只有达到了一定含量才会参与伴生金属量的统计。

2.2.2 圈定条件式的设定与解析 解决复杂条件下单工程矿体自动化圈定的关键在于如何将每一个圈定矿体(或品级)的圈定规则转化为计算机能够识别的表达式语句。通过表达式的组织，能够快速而准确地对某一矿体(或品级)的圈定规则进行归纳，根据圈定表达式判断当前样品的品位或属性参数是否符合圈矿条件。

以某铁矿为例说明实现流程。该勘查区的矿石圈定指标如下表 1 所示，在区分磁铁矿与赤铁矿的基础上对每种矿的工业与低品位矿体进行圈定。由于该矿区的铁矿石中有共生的硫铁矿，因此在计算矿量时还需要按比例扣除全 Fe 中硫化铁所带的 Fe 含量。

根据上述矿区的工业指标要求，将矿石分为 4 个等级并扣除其中硫化铁所含的铁，生成的条件表达式如表 2 所示。

2.2.3 单工程矿体自动圈定流程 通过条件表达式的判断，只是初步确定了样品是否符合矿石品级要求，还要对矿体进行矿段长度(即最低可采厚度)、连续取样时允许的夹石剔除厚度等参数进行判断，最后生成连续的圈定矿段。具体的圈定流程如下：(1)首先基于条件表达式判断样品品位是否符合要求；(2)判断是否为连续取样、两段矿之间的间隔是

表 1 某铁矿矿体圈定工业指标

Table 1 Ore delineation industrial index for one iron ore deposit

矿石类型	类型判定条件	工业品位	边界品位	可采厚度(m)	夹石剔除厚度(m)
磁铁矿	$mFe/Tfe \geq 15\%$	$(TFe) \geq 20\%$	$(TFe) \geq 18\%$	≥ 5	5
赤铁矿	$mFe/Tfe < 15\%$	$(TFe) \geq 30\%$	$(TFe) \geq 20\%$	≥ 5	5
黄铁矿	—	$TS \geq 13$	$TS \geq 8$	≥ 4	4

注：样品中 S 含量大于 8% 时，根据硫化铁中 S 和 Fe 的比例 0.875，扣除全 Fe 中硫化铁所带的 Fe 含量。

表 2 某铁矿区矿体圈定表达式

Table 2 Ore delineation expression for one iron ore deposit

矿体名称	圈定表达式
工业磁铁矿	$(mFe/TFe \geq 0.15) \&\& (TS < 8 \&\& TFe \geq 20) \parallel (TS \geq 8 \&\& (TFe - 0.875 \times S) \geq 20)$
工业赤铁矿	$(mFe/TFe < 0.15) \&\& (TS < 8 \&\& TFe \geq 30) \parallel (TS \geq 8 \&\& (TFe - 0.875 \times S) \geq 30)$
工业黄铁矿	$TS \geq 13$
低品位磁铁矿	$(mFe/TFe \geq 0.15) \&\& (TS < 8 \&\& TFe \geq 15) \parallel (TS \geq 8 \&\& (TFe - 0.875 \times S) \geq 15)$
低品位赤铁矿	$(mFe/TFe < 0.15) \&\& (TS < 8 \&\& TFe \geq 20) \parallel (TS \geq 8 \&\& (TFe - 0.875 \times S) \geq 20)$
低品位黄铁矿	$TS \geq 8$

表 3 08 号钻孔 67 号~101 号取样段加权平均品位

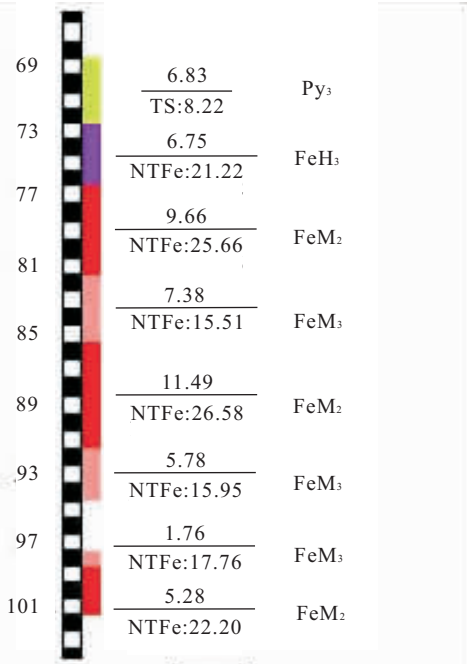
Table 3 Sample grade weighted average of drill 08 as sample number from 67 to 101

矿体	样号	样品品位(%)				样长(m)	真厚(m)	矿段品位(%)	
		TFe	mFe	FeO	TS			TS	NTFe
Py ₃	69	11.10	0.20	0.00	8.11	1.77	6.83	8.22	3.98
	70	13.24	0.55	0.00	10.02	1.66			
	71	7.56	0.20	0.00	6.42	1.68			
	72	5.94	0.30	0.00	8.36	1.72			
FeH ₃	73	20.10	0.40	12.35	0.45	1.66	6.75	1.61	21.22
	74	19.68	0.30	11.06	1.09	1.68			
	75	21.40	0.42	13.51	2.46	1.68			
	76	23.60	0.60	11.76	2.39	1.73			
FeM ₂	77	21.80	4.80	12.99	1.12	1.97	9.66	2.01	25.66
	78	23.80	15.40	11.58	2.21	1.99			
	79	31.50	24.00	13.79	1.37	2.00			
	80	27.40	20.10	11.96	2.57	1.87			
	81	23.70	14.88	11.50	2.87	1.83			
FeM ₃	82	17.50	5.90	9.06	5.12	1.87	7.38	4.77	15.51
	83	19.44	8.00	9.39	0.55	1.76			
	84	15.40	0.70	9.67	3.58	1.95			
	85	18.32	1.10	9.62	9.84	1.80			
FeM ₂	86	23.80	19.40	16.94	1.44	1.74	11.49	1.91	26.58
	87	27.80	23.40	11.76	0.61	2.00			
	88	24.00	19.30	9.06	2.18	2.00			
	89	27.40	22.60	9.26	1.86	2.00			
	90	28.80	23.00	9.52	2.57	1.75			
	91	27.60	22.30	11.06	2.84	2.00			
FeM ₃	92	17.20	8.00	5.48	6.92	1.86	5.78	6.21	15.95
	93	15.10	8.60	5.35	3.81	2.00			
	94	22.64	10.30	8.29	8.01	1.92			
夹石	95	18.60	4.00	0.00	10.08	1.76			
	96	20.80	5.50	0.00	10.92	1.76			
	97	7.36	2.00	0.00	2.59	1.76			
FeM ₃	98	17.76	10.70	4.68	1.72	1.76	1.76	1.72	17.76
FeM ₂	99	20.80	12.30	6.00	2.98	1.76	5.28	1.34	22.20
	100	25.00	20.50	6.00	0.66	1.76			
	101	20.80	16.90	4.07	0.37	1.76			

注:NTFe 表示扣除 TFe 中硫化铁所含的 Fe 含量之后的可利用的净铁含量。

否小于夹石剔除厚度、合并后矿段品位是否符合当前圈定品级要求;如果是,则合并圈定矿段,否则新建矿段或不合并;(3)循环上述操作至所有样品都完成判断;(4)按最低可采厚度对所有矿段长度进行判

断,如果矿段长度小于最小可采厚度且品位×长度小于米百分率值,则删除该矿段,反之则保留;(5)更换圈定表达式,重复(1)~(4)步骤,进行下一品级矿石的圈定;表 3 详细列出了该取样段样品主要的取



Py₃: 低品位硫铁矿; FeH₃: 低品位赤铁矿
FeM₂: 工业磁铁矿; FeM₃: 低品位磁铁矿

图 2 08 号钻孔 67 号~101 号取样段圈定结果

Fig. 2 Partial ore delineation segments of drill 08, which sample number from 67 to 101

样分析信息与矿段加权平均品位计算结果,图 2 显示了试验铁矿 08 号钻孔 69 号~101 号取样段圈定的结果.从圈定的结果可以看出,生成的矿段与工业指标要求一致,完全符合矿石品级分类和矿体圈定的要求.

2.3 基于语义识别的矿体剖面自动连接

基于工程矿体的圈定结果,进行剖面矿体与地质体的生成.一些学者已经针对剖面地质体的自动化生成做了相关的研究,但是由于矿床的类型、成因、构造背景等因素,目前还没有一个完整、通用的剖面矿体自动化生成的解决方法.本文通过将地质人员进行剖面矿体连接的一些基本要求与规则进行参数化处理,基于属性与规则判断的方法,来实现自动化的工程间矿体连接.具体的实现流程如下.

2.3.1 矿体连接参数设置 在进行矿体连接前,首先要确定钻孔间矿体的连接规则.主要考虑以下 3 个方面:(1)矿石品级.相同类型的矿石品级允许相连;(2)矿体产状.设置矿体的最大剖面倾角,如果连接生成的矿体倾角小于该值则允许连接;(3)工程控制程度.设置矿体最大连接距离,如果钻孔间距大于该值时,只能进行矿体尖灭.

2.3.2 矿体外推处理设置 当在矿体间找不到对应的连接时,就要对矿体进行外推处理.矿体外推的距离根据工程的控制程度、见矿的品位值来确定.具体设置如下:(1)工程间距外推.根据不同的工程间距设置不同的外推比例,如 30~80 m 为工程间 1/2 外推,80~120 m 为 1/3 外推等;(2)矿体边界外推.边界矿体的外推由勘探网度控制,如勘查线间距的 1/4 等;(3)最小外推矿段设置.当矿段长度小于该值时,不进行矿体外推,如小于可采厚度.

2.3.3 矿体自动连接过程 设置完工程间矿体连接与外推规则之后,基于一定的自动连接算法进行剖面矿体的自动连接.本文对徐磊等(2007)提出的基于地层层序与属性语义的相邻钻孔地层连接与推理方法进行了扩展,使其应用与剖面矿体的自动连接与矿体外推.具体的实现流程如下:(1)首先对工程的矿段数据进行处理,将相同品级或矿体编号且大于采剥比的矿段进行合并;(2)通过两两工程间对应连接规则对符合连接条件的矿体进行自动连接;(3)对剩下的矿段按矿体外推设置进行矿体外推处理;(4)交互修改.剖面矿体自动连接之后,地质工程师可以根据地质实际情况进行适当的修改.图 3 展示了某煤田勘查区,基于煤层编号自动生成剖面煤层矿体的效果图,通过相邻钻孔中煤层编号的对应关系自动生成煤层.

2.4 矿体空间模型的建立

形成剖面矿体之后,可以利用剖面间矿体的对应关系建立矿体的三维表面模型.基于线框建模技术生成矿体表面模型,其原理是将空间目标剖面上两两相邻的矿体形态控制点按一定的连接规则自动连接起来,形成一系列多边形.然后把这些多边形面拼接起来形成一个多边形网格来模拟地质边界或

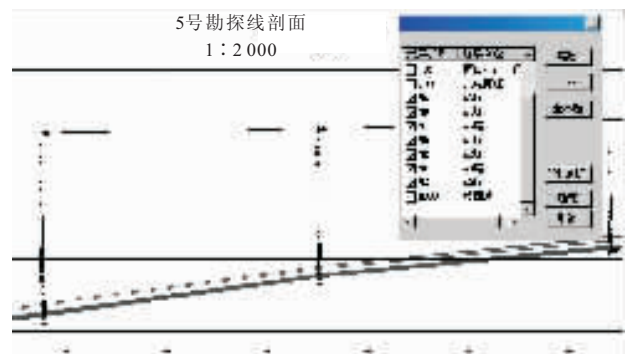


图 3 两两钻孔之间相同煤层编号煤层的自动连接

Fig. 3 Coal seam automatically contours based on same coal code between two adjacent drills

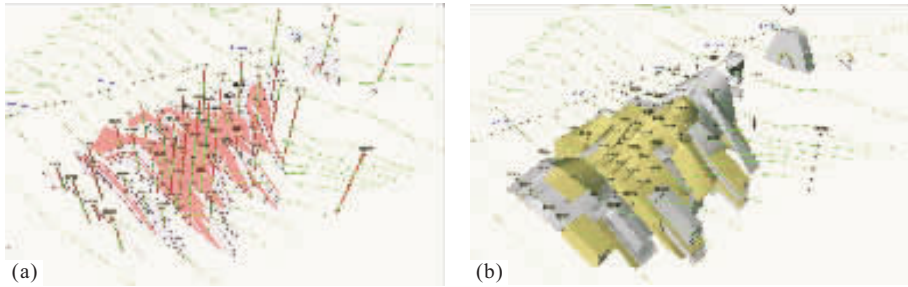


图4 矿体三维实体模型构建

Fig. 4 Orebody 3D solid modeling

a. 平行剖面线框模型; b. 矿体实体模型

矿体边界(史文中等,2007),该建模技术与矿产勘查业务结合最为紧密.其建模基本流程如下:首先根据勘探剖面图建立矿体的勘查剖面线框模型(图4a);然后按照矿体的产状,通过剖面轮廓线重构技术将相邻剖面间的矿体(地质体)模型进行连接生成三维的矿体(地质体)模型,并以封闭 TIN 的形式进行存储(张宝一等,2007)(图4b).

在轮廓线拼接过程中,主要要解决以下几个问题(Meyers *et al.*, 1992):(1)如何确定剖面间轮廓线的对应关系;(2)采用何种算法对轮廓线进行拼接;(3)在剖面矿体(地质体)连接过程中,由于地质构造的复杂性,会出现剖面间对应面数目不一致的情况(如1对多,多对多等),如何在构面时其进行分叉处理.

在矿产勘查中,剖面间矿体面的对应关系,一般由地质工程师通过综合分析矿体分布之后确定,因此本文主要关注在对应关系建立之后采用怎样的方法对矿体进行表面建模,并处理相应的分叉情况.关于轮廓线拼接的实现技术,目前已有较为成熟的算法,如最大体积法(Keppel, 1975)、最短对角线法(Christiansen and Sederberg, 1978)和相邻轮廓线同步前进法(Ganapathy and Dennephy, 1982)等,而针对多对多连接与分叉处理的研究目前还没有一个通用的解决方案,主要的难点在于构桥点的选择以及后期的模型生成(Meyers *et al.*, 1992).由于在矿产勘查数据处理中,符合地质实际是最为主要的,而且在矿体外推时也有相应的规范,如沿矿体产状进行工程间 $1/2$ 、 $1/3$ 距离外推等,因此本文通过以下过程来对分叉矿体的连接进行处理:(1)数据预处理;(2)执行“构桥”算法;(3)执行拼接算法.

2.4.1 数据预处理 在进行多对多连接前,首先由地质工程师确定矿体尖灭的规则,可设置的参数主要为对应关系、尖灭距离(如工程间距的 $1/2$ 、勘查

线间距的 $1/2$ 等)等.同时针对地质体的不确定性和复杂性,在剖面矿体轮廓线拼接时,可以添加分叉辅助线,通过人机交互方式实现分叉矿体(地质体)模型的构建.在矿体(地质体)边界处,对矿体进行尖灭处理,处理的方式按照固体矿产矿体外推规范,包括梯台尖灭、楔形尖灭和锥形尖灭3种方式.

2.4.2 执行“构桥”算法 设置完连接规则之后,通过计算得到连接两条分支轮廓线的分支部分的多边形“桥”.对多边形“桥”进行插值,分支的尖灭点位置确定插点的坐标值.对插值后的多边形“桥”进行三角剖分.将不属于多边形“桥”的两条轮廓线的其他部分合并成一条轮廓线.

2.4.3 执行拼接算法 即将合并后的轮廓线与其对应的轮廓线进行拼接.图5表示了1对2情况下,矿体的分叉连接生成示意.

2.5 矿体属性模型的建立

矿体属性的空间分布模型,是矿体资源量估算与矿山开采设计必要依据之一.矿体属性模型的建模主要以矢量—栅格结合的混合模型为主,其中在矿体建模中应用最为广泛的是 TIN+Octree 混合模型与 Wire Frame+Block 混合模型(姜华等, 2005;史文中等,2007).本文采用 TIN+Octree 混合建模的方式,以 TIN 表达矿体三维空间形态,Octree 组织矿体内部的品位分布.

其建模过程如下:首先利用矿体表面建模技术(如本文中应用的剖面轮廓线重构技术)生成矿体表面模型并存储成 TIN 模型;建立勘查区矿体块体的空块模型,导入矿体 TIN 表面模型,依据多边形与 TIN 的相交关系对空块进行取舍,位于边界上的块体基于 Octree 结构进行细分,剔除在 TIN 外部的子块.图6为基于 TIN+Octree 混合模型生成矿体品位模型的示意图.在整个建模过程中,主要是要解决块体与多边形之间位置关系的判断和判断效率问

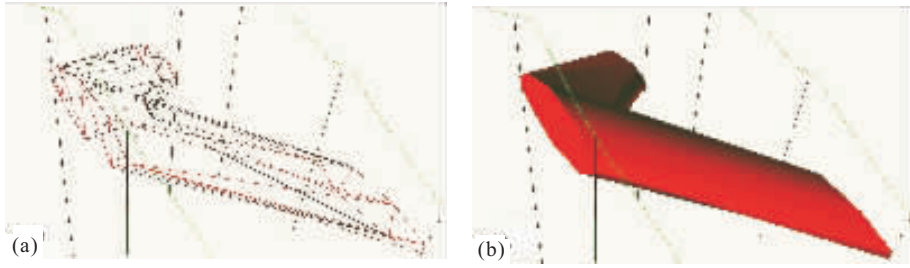


图 5 1 对 2 矿体连接线框示意

Fig. 5 Orebody contours for 1 to 2 wireframe models

a. 线框模型; b. 表面模型

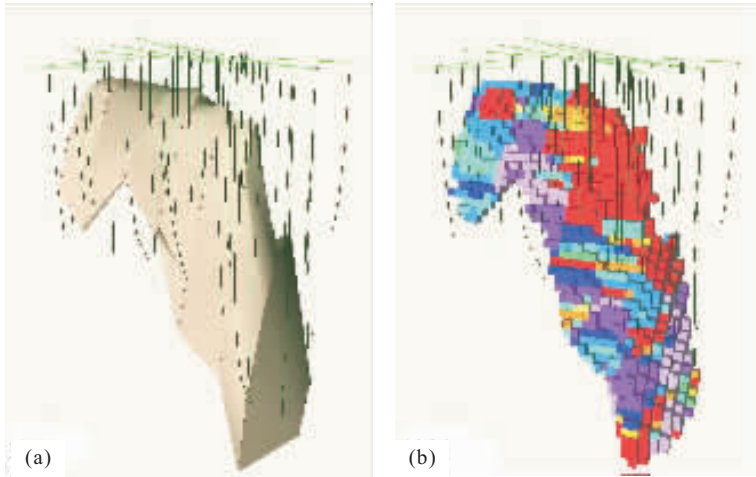


图 6 基于矿体表面模型的品位模型

Fig. 6 Orebody block model confined by orebody surface model

a. 矿体表面模型; b. 矿体块体模型

题. 块体与多边形之间位置关系的判断可以简化成点与多面体之间的位置判断问题. 采用向量运算法进行点与多面体位置的判断: 首先利用方向包围盒树(oriented bounding box, OBB)或空间二分树(binary space partition, BSP)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(毕林等, 2008).

在生成矿床空间属性模型的基础上, 对属性模型进行块体赋值. 目前国内外通用的矿体块体赋值方法有距离反比法、普通克里格法、指示克里格法、泛克里格法等. 具体处理步骤为: 首先对原始样品进行组合样划分, 然后对组合后的样品进行数据分析确定样品分布形态, 然后通过结构分析理解空间样品分布的相关性, 最后通过合适的估值算法对属性模型进行块体赋值(刘海英等, 2009).

3 结语与展望

目前利用三维视图对矿产勘查成果进行综合的表达已成为当今矿产资源勘查的主要工作模式(李超岭等, 2004; 王瑞江等, 2008). 数字化的矿床建模方法在很大程度上提高了地质工程师的工作效率, 使其对勘查区的矿体空间特征与品位分布有了深入的理解. 本文提出的数字矿床建模方法, 已应用在由中国地质调查局主持、中国地质调查局发展研究中心与中国地质大学(武汉)教育部地理信息系统软件及应用工程中心共同研发的三维可视化矿产勘查数据处理与成果编制软件——资源量估算与矿体三维建模系统(iExploration-EM)的设计与开发中(李超岭等, 2008), 实现矿产地质勘查信息处理及危机矿山资源接替找矿项目成果报告编制的一体化处理, 为地质工程师获得详实的矿产资源储量提供了数字化、可视化、智能化的辅助工具, 同时也为下一步的

矿山开采设计、矿床经济评价提供精确的数字模型.

References

- Bi, L., Wang, L. G., Chen, J. H., et al., 2008. Study of octree-based block model of complex geological bodies. *Journal of China University of Mining & Technology*, 37(4): 532—537 (in Chinese with English abstract).
- Chen, A. B., Qin, D. X., Zhang, X. S., et al., 2004. 3D model for deposit based on MICROMINE technology. *Geology and Prospecting*, 40(5): 77—80 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G. X., Zhang, X. L., Chen, Y. S., 2008. Modeling study of mineral reserves calculation system. *China Mine Engineering*, 37(3): 33—37 (in Chinese with English abstract).
- Christiansen, H. N., Sederberg, T. W., 1978. Conversion of complex contour line definitions into polygonal element mosaics. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 12(3): 187—192.
- Ekoule, A. B., Peyrin, F. C., Odet, C. L., 1991. A triangulation algorithms from arbitrary shaped multiple planar contours. *ACM Transactions on Graphics*, 10(2): 182—199.
- Ganapathy, S., Dennephy, T. G., 1982. A new general triangulation method for planar contours. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 16(3): 69—75.
- Huang, Y. L., Qin, D. X., Li, L. W., 2007. Status of surpacion and its application in digital mine. *Express Information of Mining Industry*, 457: 27—30 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H., Qin, D. X., Chen, A. B., et al., 2005. Status and tendency of mining software development at home and abroad. *Mineral Resources and Geology*, 19(110): 422—425 (in Chinese with English abstract).
- Keppel, E., 1975. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines. *IBM Journal of Research and Development*, 19(1): 2—11.
- Li, C. L., Yang, D. L., Li, F. D., et al., 2008. Basic framework of the digital geological survey system and application of its key technology. *Geological Bulletin of China*, 27(7): 923—944 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. L., Zhang, K. X., Yu, Q. W., et al., 2004. Inherited technique of data model in different stages in digital mapping. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 745—752 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. Y., Liu, X. G., Li, C. L., 2009. Realization and application of 3D reserves estimation system based on geostatistics. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 541—546 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. G., Chen, G. L., Hou, W. S., et al., 2006. 3D complex geological entity modeling method based on line-frame model. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(5): 668—672 (in Chinese with English abstract).
- Meyers, D., Skinner, S., Sloan, K., 1992. Surfaces from Contours. *ACM Transactions on Graphics*, 11(3): 228—258.
- Qi, A. W., Wu, L. X., Hou, N. K., et al., 2001. Introduction of 3D geoscience model and several key issues of its application to mine. *China Mining Magazine*, 10(5): 61—64 (in Chinese with English abstract).
- Shi, W. Z., Wu, L. X., Li, Q. Q., et al., 2007. Model and algorithms for three dimensional spatial information system. Electronics Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, R. J., Wang, Y. T., Wang, G. S., et al., 2008. Analysis on the state of the worldwide mineral exploration. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 154—162 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. S., Zhu, G. C., Zeng, X. P., et al., 2004. The research and application of 3D-GIS in solid mineral exploration and mining. *Geology and Prospecting*, 40(1): 68—72 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Ma, X. G., Tian, Y. P., 2006. Application recursion arithmetic on single engineering orebody delineation. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 58(6): 21—24 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Wu, L. X., Che, D. F., 2007. Strata connection and reference between adjacent boreholes based on stratum sequence and semantics. *Geography and Geo-Information Science*, 23(1): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. Y., Shang, J. G., Wu, H. M., et al., 2007. Application of 3D geological modeling and visualization in solid mineral resource estimation. *Geology and Prospecting*, 43(2): 76—81 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., 2002. “Three-component” quantitative resource prediction and assessments: theory and practice of digital mineral prospecting. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 482—489 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

毕林, 王季管, 陈建宏, 等, 2008. 基于八叉树的复杂地质体块

- 段模型建模技术. 中国矿业大学学报, 37(4): 532—537.
- 陈爱兵, 秦德先, 张学书, 等, 2004. 基于 MICROMINE 矿床三维立体模型的应用. 地质与勘探, 40(5): 77—80.
- 陈国旭, 张夏林, 陈雅淑, 2008. 固体矿产储量估算系统建模研究. 中国矿山工程, 37(3): 33—37.
- 黄艳丽, 秦德先, 李连伟, 2007. Surpac Vision 及其在数字矿山中的应用. 矿业快报, 457: 27—30.
- 姜华, 秦德先, 陈爱兵, 等, 2005. 国内外矿业软件的研究现状及发展趋势. 矿产与地质, 19(110): 422—425.
- 李超岭, 杨东来, 李丰丹, 等, 2008. 中国数字地质调查系统的基本构架及其核心技术的实现. 地质通报, 27(7): 923—944.
- 李超岭, 张克信, 于庆文, 等, 2004. 数字填图中不同阶段数据模型的继承技术. 地球科学——中国地质大学学报, 29(6): 745—752.
- 刘海英, 刘修国, 李超岭, 2009. 基于地质统计学法的三维储量估算系统研究与应用. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 541—546.
- 刘修国, 陈国良, 侯卫生, 等, 2006. 基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法. 地球科学——中国地质大学学报, 31(5): 668—672.
- 齐安文, 吴立新, 侯恩科, 等, 2001. 三维地学模拟述评及其矿山应用关键问题. 中国矿业, 10(5): 61—64.
- 史文中, 吴立新, 李清泉, 等, 2007. 三维空间信息系统模型与算法. 北京: 电子工业出版社.
- 王瑞江, 王义天, 王高尚, 等, 2008. 世界矿产勘查态势分析. 地质通报, 27(1): 154—162.
- 吴健生, 朱谷昌, 曾新平, 等, 2004. 三维 GIS 技术在固体矿产勘探和开发中的研究与应用. 地质与勘探, 40(1): 68—72.
- 徐兵, 马小刚, 田宜平, 2006. 递归算法在单工程矿体边界圈定中的应用. 有色金属(矿山部分), 58(6): 21—24.
- 徐磊, 吴立新, 车德福, 2007. 基于地层时序与属性语义的相邻钻孔地层连接与推理. 地理与地理信息科学, 23(1): 1—4.
- 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏, 等, 2007. 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. 地质与勘探, 43(2): 76—81.
- 赵鹏大, 2002. “三联式”资源定量预测与评价—数字找矿理论与实践探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 482—489.