

郭甲腾, 吴立新, 周文辉. 基于径向基函数曲面的矿体隐式自动三维建模方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2130–2135. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0688

Guo Jiateng, Wu Lixin, Zhou Wenhui. Automatic ore body implicit 3D modeling based on radial basis function surface[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2130–2135. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0688

基于径向基函数曲面的矿体隐式自动三维建模方法

郭甲腾^{1,2}, 吴立新^{1,2,3}, 周文辉^{1,2}

(1. 东北大学 灾害遥感与数字矿山研究所 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室 辽宁 沈阳 110819; 3. 中国矿业大学 环境与测绘学院 江苏 徐州 221116)

摘要: 矿体三维建模与可视化是矿山信息化与数字矿山的核心内容。目前国内外矿业软件普遍采用基于序列剖面或中段平面矿体边界多边形连接的显式矿体建模方法, 建模过程需要大量人工交互且数据更新后模型重建困难。引入径向基隐函数, 提出一种基于隐式曲面的矿体自动建模方法。该方法无需手工圈定矿体边界, 直接基于钻孔化验数据进行空间插值, 自动构建矿体三维模型曲面, 并能针对夹石体自动单独建模; 作为建模参数, 边界品位重新设定后可自动更新重建矿体三维模型。针对某矿山数据进行了不同边界品位的矿体自动建模实验, 与显式方法建模结果对比表明, 基于径向基函数隐式曲面的矿体建模方法自动化程度高、模型光滑且无拓扑错误, 可为国内数字矿山与地学三维软件的研发提供新方案。

关键词: 数字矿山; 三维地学建模; 矿体建模; 隐式建模; 径向基函数

中图分类号: TD67

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2016)08-2130-06

Automatic ore body implicit 3D modeling based on radial basis function surface

GUO Jia-teng^{1,2}, WU Li-xin^{1,2,3}, ZHOU Wen-hui^{1,2}

(1. Institute of Disaster Remote Sensing and Digital Mine, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Three-Dimensional (3D) modeling and visualization of ore body are the core contents of mine informatization and digital mine. Nowadays, the main method adopted by most international and domestic software is explicit modeling method based on the wireframe connection of sequential sections or middle plane boundary polygons of ore body. Many human interactions are required during the modeling process and the models' reconstruction is very difficult when new data come. In order to promote the automation level, a radial basis function was introduced in this paper and a novel ore body modeling and reconstruction method based on implicit surfaces was proposed. The 3D boundary surfaces of ore bodies were constructed by interpolating the grade data sampled by drill holes directly, without delineating the sections of ore bodies manually. Meanwhile, the inside rock models were constructed separately and automatically. Also, the cut-off grade could be treated as a modeling parameter for automatically reconstructing the ore body models. Based on the exploration data of a certain mine, implicit ore body modeling experiments on different cut-off grades were carried out. The comparison between implicit and explicit modeling results demonstrated that implicit ore body modeling method based on radial basis function has a high automatic level. Meanwhile the ore body models were very smooth without any topological errors. The method proposed in this paper can provide an new solution for the development of digital mine and 3D geoscience software.

收稿日期: 2016-05-26 修回日期: 2016-06-22 责任编辑: 许书阁

基金项目: 辽宁省科学技术基金资助项目(2015020581); 中央高校基本科研业务费资助项目(N140104002); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB227902)

作者简介: 郭甲腾(1980—), 男, 安徽桐城人, 讲师, 博士。Tel: 024-83691628 E-mail: guojiateng@mail.neu.edu.cn

Key words: digital mine; 3D geosciences modeling; ore body modelling; implicit modelling; radial basis function

矿体三维建模是依据测量、采样和岩性等数据,对矿体对象空间几何形态与属性分布的三维重建,是数字矿山软件平台的核心功能,近年来已成为三维地质建模领域的研究热点^[1-4]。相较于传统三视图,矿体三维模型具有更加直观的立体表达与空间可量测性,在矿产资源勘探、开发与评估等方面发挥着重要作用。在找矿勘探阶段,钻探和槽探是目标区域地质结构、矿物赋存状态的重要获取方式。该类数据精度较高,不仅记录孔口的空间位置和钻孔测斜数据,又详细记录矿物化验与岩性素描信息^[5]。基于这些信息,可计算出钻孔轨迹的空间形态,结合矿石品位及其相对位置,可以得到钻孔轨迹上各采样位置的矿石品位值。经过多年的研究,基于钻孔数据构建矿体三维模型已有一些经典实用的方法,如基于序列勘探线剖面的矿体轮廓线连接法^[6-7]、基于广义三棱柱体元的矿体自动建模法^[8-10]、基于 Kriging 插值的矿体层面建模法^[11]等一系列建模方法,按照建模过程及模型的数学特征,可以分为显式建模和隐式建模两类。

所谓显式建模,即在三维可视化环境下,通过人工交互进行线框连接,所见即所得地建立三维模型。显式建模的经典方法是基于序列勘探线剖面的矿体轮廓线连接法,在国内外主流矿业建模软件中普遍采用。但显式方法的整个建模过程需要大量手工交互,对于剖面数量多、形态复杂的矿体,该方法效率较低的局限性也逐渐突显出来^[12];更重要的是,建模结果往往存在三角形交叉等拓扑错误,需要后期校验和修正;构建的模型表面粗糙、棱角尖利,可视化效果较差;尽管该方法便于融入建模者的经验,但存在经验水平及理解差异,易造成模型的多解性与不确定性^[13];此外,当建模数据发生局部变动时,需要建模人员重新解释数据、圈定剖面与连接建模,因而模型更新步骤繁多,过程复杂^[14]。

相对于显式建模,隐式建模是指基于空间采样数据,通过空间插值构建三维实体表面的隐式函数表达(即 $f(x, y, z) = 0$)。为实现三维模型的计算机可视化,需通过多边形网格化方法得到实体模型的显式面片模型。隐式建模方法可以自动插值空间采样数据,不需要人工交互即可直接构建出符合采样数据的空间曲面,建模自动化程度较高。近年来,隐式建模技术在矿体三维建模领域开始受到关注,如径向基神经网络^[15]、线性插值^[16]被应用于品位估算^[17],但未给出具体的矿体模型三维重建方法。

本文将径向基隐函数曲面引入到矿体三维建模

中,选择距离三次方的基函数及 Hermite 型径向基隐函数作为矿体的隐式表达函数,根据建模边界控制品位的大小,搜索确定出矿体模型在钻孔上的边界点位置及相应的法向量信息,由此插值计算出矿体模型的隐式表达函数;并通过移动立方体隐式曲面多边形化网格化技术,实现矿体模型的显式三维表达;并针对夹石体建模、不同边界品位下矿体模型快速重建进行了讨论,通过实际数据验证了径向基隐函数曲面应用于矿体自动三维建模与模型更新的可行性。

1 径向基函数隐式三维建模原理

隐式曲面应用于矿体三维建模的关键在于选择合适的隐式插值函数,以构造矿体对象合理的隐式函数表达。考虑到钻孔采样数据本身所具有的空间场性质,即钻孔品位数据不仅反映了采样位置的矿石品位值,亦可以据此推估得到附近位置的品位值,且两者在空间距离上存在相关性。在各类隐式曲面中,径向基隐函数曲面是以相对于采样点欧式距离为自变量构造的曲面函数表达,可以充分利用采样位置自身的场效应,故采用径向基隐函数插值钻孔采样数据,圈定矿体的三维模型。

径向基隐函数曲面,是将一系列的径向基函数组合形成三维实体的表达函数,通过等值面提取得到的三维空间曲面。径向基函数是一个取值仅依赖相对于空间采样位置距离的实值函数,将其记为 $\varphi(x) = \varphi(\|x - P\|)$,此处的 $\varphi(x)$ 即为基函数,包括全局支撑径向基函数与局部紧支撑径向基函数^[18]。径向基函数的选取考虑到实际数据的特征,采用较为通用的距离三次方的全局支撑径向基函数进行建模(即 $\varphi(t) = t^3$)。为了能够通过曲面法向量进一步约束模型的三维空间形态,采用 Hermite 型隐函数(Hermite Radial Basis Function, HRBF)表达^[19-20]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \varphi(x - x_i) - \beta_i \nabla \varphi(x - x_i)] \quad (1)$$

其中 $\varphi(x)$ 为径向基函数; α_i, β_i 为由坐标与梯度数据确定的隐函数待定系数, $\alpha_i \in R, \beta_i \in R^3$,可由下列公式求解得到:

$$\begin{cases} f(x_j) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \varphi(x_j - x_i) - \beta_i \nabla \varphi(x_j - x_i)] = 0 \\ \nabla f(x_j) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \nabla \varphi(x_j - x_i) - H \varphi(x_j - x_i) \beta_i] = n_j \end{cases}$$

(2)

其中 H 为 Hess 算子:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x \partial x} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2}{\partial y \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial z \partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过式(2)建立线性方程组,求解即可得到 Hermite 径向基隐函数曲面中的待定系数,最终确定矿体模型的 Hermite 径向基隐函数表达。

需要注意的是,隐函数表达的矿体模型不能直接在计算机中三维显示,需要采用一定的显式化采样方法,如多边形网格化技术,将矿体隐式曲面转化为三角形等计算机可绘制的几何网格模型。采用当前主流的移动立方体方法^[21]对隐函数曲面进行多边形化,该方法根据可视化精度要求,将整个建模空间划分为相应粒度的满铺盖立方体单元集合,通过计算各个立方体顶点的函数值,提取出一张函数值为 0 的等值面,该等值面即为矿体对象的显式三维边界模型。

2 矿体隐式建模与更新重建流程

由钻孔采样化验可得到一系列包含矿石品位信息的空间采样位置,并通过边界控制品位划分矿岩边界。因此,在矿体建模前,需首先确定钻孔上边界品位值所对应的空间位置,以及该位置对应的曲面法向量约束(约定曲面法向量指向矿体内部,即指向品位值较大的位置)。基于上述原理,将矿体边界点坐标与向量作为已知数据,解算出矿体模型表面的隐式函数表达;最后,在设定的可视化精度下,通过移动立方体方法对模型表面进行重采样,实现矿体模型隐式表面的多边形网格显式转换与可视化表达。此外,边界品位值可作为矿体模型表面边界的控制参数,变动后可由程序自动重建出新的矿体模型。

矿体隐式三维建模可视化与更新重建总流程如图 1 所示,具体步骤描述如下:

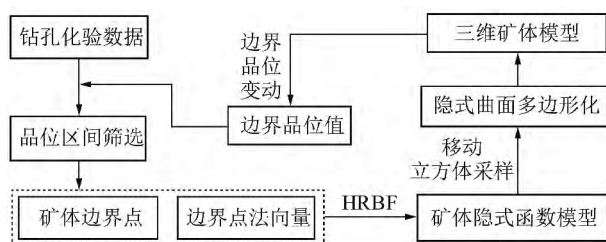


图 1 基于径向基函数的矿体隐式建模流程

Fig. 1 Flow chart of implicit ore body modeling based on HRBF

Step 1 钻孔上矿体边界位置的确定。结合矿山

生产经济要素给定矿体圈定的边界品位值,根据钻孔上各样品化验区间的品位值与边界品位值的大小关系,判断出各化验区间是否位于圈定范围内,并由相邻且品位值分布于边界品位两侧的化验区间交界点作为矿体边界点;

Step 2 钻孔边界位置法向量计算。由边界点确定方法可知,边界点两侧矿段的品位值分布于边界品位的两侧,沿着该点处钻孔方向,将指向高品位的单位向量作为该边界位置处的矿体模型法向量;

Step 3 隐函数曲面方程系数解算。将上述步骤中计算出来的所有矿体边界位置点空间坐标及其对应的曲面法向量作为已知数据,代入式(3)中,建立系列方程求解径向基隐函数曲面方程中的待定系数,从而得到矿体模型的隐函数曲面方程,即矿体模型的隐式表达;

Step 4 隐式曲面三维可视化。根据模型的可视化精度要求,采用移动立方体方法对矿体模型的隐函数曲面进行空间采样,转化为多边形网格化表达的矿体显式模型,并进行三维可视化;

Step 5 根据不同的边界品位值,重新执行上述 Step 2 ~ Step 4 的建模过程,可实现同一钻孔数据不同边界品位控制下系列三维矿体模型的快速自动重建。

3 矿体三维建模实验分析

3.1 矿体隐式建模原型系统

在上述算法流程的基础上,基于 QT 应用程序框架与 OpenGL 三维图形函数库,采用面向对象的分析与程序设计方法,通过 C++ 编码开发了矿体隐式三维建模原型系统,主要包括三维可视化图形区、菜单栏、工具栏、工程控制浮动框、属性查询浮动框、建模过程动态输出信息浮动框。可实现钻孔数据的导入、三维显示;矿体隐式三维建模、不同边界品位值控制下的矿体模型快速重建、矿体模型属性信息查询、不同透明度的矿体模型三维显示,以及基于树形控件的钻孔、矿体模型的显示与关闭等功能,如图 2 所示。

3.2 实验区介绍

基于上述建模流程与建模系统,针对某矿山钻孔数据开展了矿体三维建模实验。实验区域共包含 56 个钻孔与 3 338 个钻孔化验样品,钻孔分布在长 256 m、宽 219 m、厚度 254 m 的空间区域中,各采样位置矿石品位值分布区间为 [0, 10]。实验首先设定矿体建模的边界品位值为 2,将钻孔轨迹依据采样数据进行颜色区分显示,将品位值大于等于 2 的化验区间显示为红色圆柱体,小于 2 的区间显示为绿色圆柱

体如图3所示。

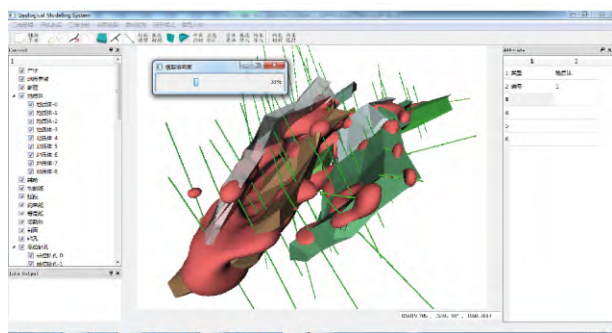


图2 矿体隐式建模原型系统

Fig. 2 Ore body modeling prototype system

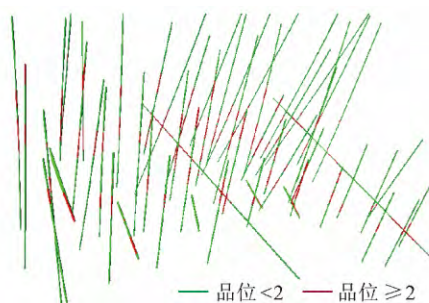


图3 基于边界品位设色的钻孔轨迹

Fig. 3 Drill hole trace colored by cut-off grades

3.3 显式矿体建模

根据绘制出来的钻孔轨迹和样品数据,圈定出各勘探线剖面上的矿体轮廓线,并采用轮廓线重构三维形体算法,人工交互、显式地构建出矿体三维模型,包含7个子矿体模型,共包含1316个三角形,如图4所示。

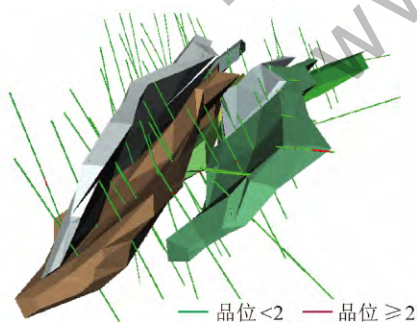


图4 基于剖面连接的矿体显式模型

Fig. 4 Explicit ore bodies modeled by section connection

矿体模型基本上揭示了矿体的空间分布形态,由于人工经验的介入,矿体的边界得到一些推估和尖灭控制,但所构建的矿体模型表面较为粗糙。因为没有专门针对夹石体进行建模,因此,缺乏对矿体中夹石的描述。而且,若更改边界控制品位,需要将整个建模过程重新人工交互执行一遍,因此,模型的更新重建比较困难。

3.4 隐式矿体建模

给定建模参数(边界品位2),针对同一实验区采用提出的隐式建模流程对矿体进行三维建模实验。隐式曲面移动采样的立方体边长设定为1.25 m,共计7282625个立方体单元参与隐函数曲面的多边形网格化运算,实现矿体隐式模型的显式表达。该过程采用并行计算技术进行,通过4个线程同步对矿体边界曲面进行多边形化。在ThinkPad笔记本电脑(1.7-GHz Intel^(R) Core^(TM) i5-4210U 8 GB内存,Intel HD显卡)上进行建模实验,径向基隐函数待定系数求解耗时约1 s,隐函数曲面多边形网格化耗时67 min,构建的矿体模型中包含221626个三角形,远远大于剖面连接构建的模型的三角形数目(1316个),因而光滑程度明显改善,如图5所示。

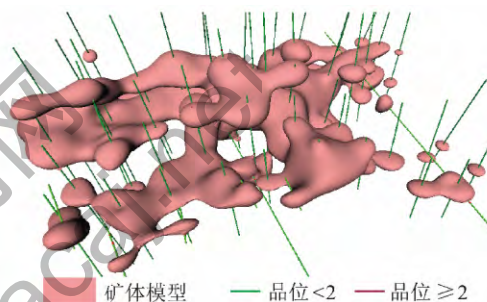


图5 Hermite 径向基隐函数圈定的矿体模型

Fig. 5 Ore body models constructed by HRBF

由图5可见,所有品位值高于边界品位的钻孔化验区间(图中红色区)均包含在矿体模型内部,表明该方法建模结果准确。同时,由于径向基隐函数曲面是一种光滑的空间插值曲面,采用移动立方体技术进行三维网格可视化时,若减小移动立方体的边长,可以提高模型的可视化表达精度,实现矿体模型光滑重建。尽管可视化精度提高时,移动立方体数量的增加会耗费更多的矿体模型曲面网格可视化时间,但建模过程无需人工干预,可完全由程序自动计算完成,并可通过并行化处理来降低耗时、提高速度。

3.5 隐式与显式建模方法对比分析

为对比显式建模和隐式建模得到的两种矿体三维模型,将显式构建的7个子矿体设置为同一颜色,并将两种方法所构建的矿体模型叠加显示(图6)。可见,在同一钻孔穿越的位置,两种构模方法构建的模型基本一致;主要差异在于无钻孔采样的区域,显式建模方法由于引入了建模人员的经验,建模结果加入了尖灭和推估,模型空间比较粗放、生硬;而隐式方法采用空间插值和数学曲面,矿体模型表面过渡更为自然、光滑。

此外,当边界品位提高时,出现小型夹石体的概

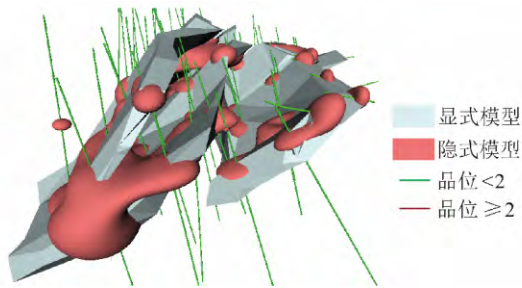


图6 矿体显式与隐式模型对比

Fig. 6 Comparison of explicit and implicit ore body models

率增大。若采用传统显式交互建模,每个夹石体都要单独处理,会增大建模工作量;而在隐式建模方法与流程中,夹石体模型和矿体模型表面均为隐函数曲面的一部分。因此,解算出来的隐函数曲面隐含了矿体和夹石的边界,需要进一步判别和区分。首先采用移动立方体方法将隐函数曲面转化为三角形集合,根据三角面片的拓扑邻接关系^[22],可将三角面片的曲面模型分解为若干空间相离的子曲面,再判断子曲面形成的系列闭合体的拓扑包含关系,则外部为矿体模型、内部为夹石体模型(图7)。

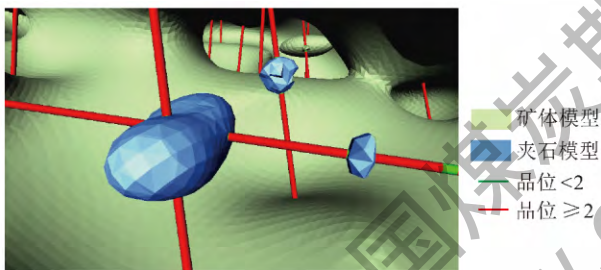


图7 矿体内部夹石体三维建模

Fig. 7 3D modeling of inside stones in the ore body

需要注意的是:模型的显式可视化精度(即移动立方体的边长)需要设定为小于最小夹石剔除厚度,才能将夹石体模型区分和显示出来;否则,可能出现夹石体包含在采样立方体内的情况,造成夹石体模型不能显式表达。

4 不同边界品位控制的模型重建

在矿山生产管理中,由于矿石市场价格的波动及选矿工艺及成本的变化,经常需要计算不同边界品位、工业品位下的矿体储量,此时,矿体模型的快速自动三维重建与对比分析尤为重要。显然,如果基于剖面连接的显式建模方法来获得不同边界品位的矿体模型,需要将整个建模过程重新执行一遍,人工交互工作量巨大,耗时很长;而采用提出的隐式建模方法,只需要重新设定边界品位值与移动立方体边长参数,其余建模流程完全由程序自动完成,较显式建模更为方便、高效。

此外,隐式建模方法可以一次性建立不同边界品位控制条件下的系列三维矿体模型,用于储量分析和评估。如图8所示,在同一原始钻孔数据约束下,边界品位分别设定为2和5,采用提出的隐式建模方法建立了两组矿体模型。可以看出,较高的边界品位构建出的矿体模型占用空间相对较小,基本上分布于较低品位圈定的矿体模型内部,且相对破碎,连续性较差,子矿体较多,这与理论分析以及实际情况相符,表明隐式矿体建模方法结果合理。

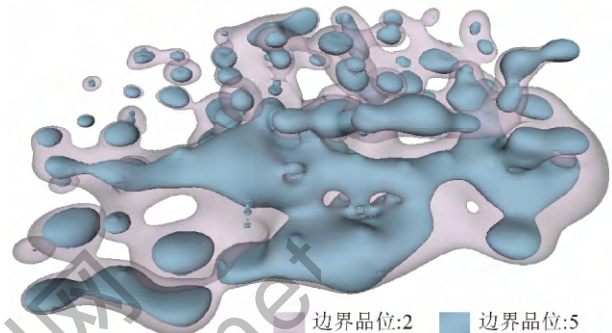


图8 不同边界品位的矿体模型对比

Fig. 8 Ore body models with different cut-off grades

5 结 论

(1) 计算机图形学理论及隐式曲面建模技术的发展,使得自动化、智能化三维矿体建模成为可能。在当前矿体显式建模研究的基础上,引入 Hermite 径向基隐函数曲面,设计了基于钻孔数据的矿体隐式三维建模流程。针对某矿山实际钻孔数据,分别采用显式和隐式方法构建了目标区域内的矿体三维模型,并进行了模型比对;同时,通过隐式建模方法构建了矿体内部的夹石模型,以及不同边界品位下的矿体对照模型。

(2) 实验结果表明:隐式方法构建的矿体模型可以保证所有品位值大于边界品位的化验区间完全位于矿体模型内部,所有品位值小于边界品位的化验区间位于矿体外部、或夹石内部,表明模型满足钻孔数据的强约束;同时,由于构建过程完全自动化,因而不同边界品位的矿体模型自动重建非常方便。根据模型更新结果可以发现,提出的隐式建模方法能够较为便捷有效地表达不同边界品位下的矿体空间范围及其形态变化。

(3) 所采用的全局径向基函数,暂不支持局部钻孔数据更新时的矿体模型局部更新,需要进一步研究局部紧支撑径向基函数以支持局部动态更新;隐函数模型的多边形化是相对耗时的过程,即使采用多线程并行技术仍需耗费较多时间,效率瓶颈在于快速排除

不需要参与计算的移动立方体单元; 由于矿体空间形态的复杂性, 建模人员的经验在三维建模中不可或缺, 如何通过机器学习等方法在隐式建模中融入专业人员经验, 是推动矿体自动三维建模方法实用化发展值得研究的重要问题。

参考文献:

- [1] Houlding S. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization [M]. London: Springer Verlag, 1994: 409–431.
- [2] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 等. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357–365.
Wu Lixin, Wang Yunjia, Ding Enjie, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357–365.
- [3] 张申, 丁恩杰, 赵小虎, 等. 数字矿山及其两大基础平台建设[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 997–1001.
Zhang Shen, Ding Enjie, Zhao Xiaohu, et al. Digital mine and constructing of its two basic platforms[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 997–1001.
- [4] Guo Jiateng, Wu Lixin, Yang Yizhou, et al. Towards a seamless integration for spatial objects and topography [A]. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Geoinformatics (Geoinformatics) [C]. Hong Kong, 2012: 1–5.
- [5] 郭甲腾. 基于剖面的三维地质建模与可视化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006: 6–10.
Guo Jiateng. 3D geological modeling and visualization based on sections [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006: 6–10.
- [6] 马洪滨, 郭甲腾. 一种新的多轮廓线重构三维形体算法: 切开-缝合法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 111–114.
Ma Hongbin, Guo Jiateng. Cut-and-sew algorithm: A new multi-contour reconstruction algorithm [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007, 28(1): 111–114.
- [7] 马洪滨, 郭甲腾. 基于剖面的面体混合三维地质建模研究[J]. 金属矿山, 2007(7): 50–52.
Ma Hongbin, Guo Jiateng. Study on facial-volumetric mixed 3D geological modeling based on sections [J]. Metal Mine, 2007(7): 50–52.
- [8] Wu Lixin. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 405–418.
- [9] 李长春, 王宝山, 薛华柱. 基于 GTP 的煤矿地质体三维建模及剖切[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1268–1271.
Li Changchun, Wang Baoshan, Xue Huazhu. Coal geological body three-dimensional modeling and cutting based on GTP [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1268–1271.
- [10] 齐安文, 吴立新, 李冰, 等. 一种新的三维地学空间构模方法——类三棱柱法[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 158–163.
Qi Anwen, Wu Lixin, Li Bing, et al. Analogical triprism: A new 3D geo-spatial modeling methodology [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 158–163.
- [11] 李晓军, 胡金虎, 朱合华, 等. 基于 Kriging 方法的煤层厚度估计及三维煤层建模[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 765–769.
Li Xiaojun, Hu Jinhua, Zhu Hehua, et al. The estimation of coal thickness based on Kriging technique and 3D coal seam modeling [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 765–769.
- [12] Cowan E J, Beatson R K, Ross H J, et al. Practical implicit geological modelling [A]. Fifth International Mining Geology Conference [C]. 2003: 17–19.
- [13] Vollgger S A, Cruden A R, Cowan J E. 3D implicit geological modeling of a gold deposit from a structural geologist's point of view [A]. 12th SGA Biennial Meeting—Mineral Deposit Research for a High-Tech World [C]. SGA, Uppsala, Sweden, 2013: 1–4.
- [14] 孙振明, 毛善君, 祁和刚, 等. 煤矿三维地质模型动态修正关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 918–924.
Sun Zhenming, Mao Shanjun, Qi Hegang, et al. Dynamic correction of coal mine three-dimensional geological model [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 918–924.
- [15] 贾明涛, 叶加冕, 寇向宇, 等. 品位估值的自适应径向基神经网络构建技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1524–1530.
Jia Mingtao, Ye Jiamian, Kou Xiangyu, et al. The adaptive Radius Basis Function neural network modeling for the deposit grade estimation [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1524–1530.
- [16] 邹艳红, 何建春. 移动立方体算法的地质体三维空间形态模拟[J]. 测绘学报, 2012, 41(6): 910–917.
Zou Yanhong, He Jianchun. A spatial shape simulation method for three-dimensional geological body based on marching cubes algorithm [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(6): 910–917.
- [17] Vollgger S A, Cruden A R, Ailleres L, et al. Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 69: 268–284.
- [18] 江永全. 径向基函数隐式曲面的研究及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 1–4.
Jiang Yongquan. Study on the RBF implicit surface and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 1–4.
- [19] Macedo I, Gois J P, Velho L. Hermite radial basis functions implicit [J]. Computer Graphics Forum, 2011, 30(1): 27–42.
- [20] Guo J, Wu L, Zhou W, et al. Towards automatic and topologically consistent 3D regional geological modeling from boundaries and attitudes [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5(2): 1–17.
- [21] Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm [A]. Seminal Graphics [C]. ACM, 1998: 347–353.
- [22] 郭甲腾, 吴立新. 栅格空间中三维地学实体拓扑关系表达的 K6N9-I 模型[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(1): 6–9.
Guo Jiateng, Wu Lixin. K6N9-I Model: A topological relation representation model for three dimensional geo-entities in raster space [J]. Geography and Geo-Information, 2008, 24(1): 6–9.