

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.09.013

矿区复杂地质构造隐式三维集成建模

刘志斌¹, 张健桥², 杜晓峰³, 郭甲腾¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013;

3. 山东轨道交通工程咨询有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 隐式建模方法具有建模过程自动化的优势, 并成功应用于浅表地质构造自动建模. 然而, 对于含侵入岩、断层、采空区等多种深部复杂地质构造的矿山区域, 自动集成建模方法仍存在困难. 本文基于HRBF(Hermite radial basis function)隐式建模方法, 针对矿区煤层、侵入岩、采空区、断层等构造分别提出了隐式建模特征向量提取方法, 并设计了构造模型与地层模型的隐式集成方法, 实现了煤矿区域复杂地质构造的拓扑一致集成建模. 济南市地铁8号线区域的实际案例研究表明, 该方法能够实现侵入岩、采空区以及断层的隐式建模, 为城市轨道交通工程建设提供了辅助决策与安全保障.

关键词: 三维地质建模; 采空区建模; 断层建模; 隐式建模; 径向基隐函数

中图分类号: TU 195 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1317-09

Implicit 3D Integrated Modeling of Complex Geological Structures in Mining Areas

LIU Zhi-bin¹, ZHANG Jian-qiao², DU Xiao-feng³, GUO Jia-teng¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shandong Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Jinan 250013, China; 3. Shandong Rail Transit Engineering Consulting Co., Ltd., Jinan 250013, China. Corresponding author: GUO Jia-teng, E-mail: guojiateng@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The implicit modeling method offers the advantage of automating the modeling process and has been successfully applied to automatic modeling of shallow geological formations. However, the automatic integrated modeling remains challenging for mine areas with multiple deep and complex geological formations such as intrusive rocks, faults and goaf. Based on the HRBF implicit modeling method, this paper proposes the implicit modeling feature vector extraction method for the coal seam, intrusive rocks, goaf, faults and other structures in the mining area, and designs the implicit integration method between the structural model and the strata model, enabling the topology-consistent integrated modeling of complex geological formations in the coal mine area. A case study of Jinan Subway Line 8 shows that this method can realize the implicit modeling of intrusive rocks, gobs and faults, which provides auxiliary support for decision-making and ensures safety in the construction of urban rail transit projects.

Key words: 3D geological modeling; goaf modeling; fault modeling; implicit modeling; radial basis implicit function

三维地质建模(3D geological modeling)^[1]是利用计算机技术将地质学数据和信息转换成三维模型的过程, 以直观、形象的方式呈现地下结构特征和物质分布情况. 三维地质模型不仅可

以帮助地质学家更好地理解地下结构, 还能结合空间信息管理、空间分析和实体内容分析、统计、预测等工具, 满足各种地下空间查询和分析需求.

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172327); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201022).

作者简介: 刘志斌(1999-), 男, 江西赣州人, 东北大学硕士研究生; 郭甲腾(1980-), 男, 安徽桐城人, 东北大学教授, 博士生导师.

现有三维建模方法按照建模过程以及模型的数学特征,可以分为三类^[2]:显式建模^[3-4]、基于空间插值函数建模^[5-7]、隐式曲面建模^[8-10]。其中隐式曲面建模方法因其具有不需要过多的人工交互、能够自动建模并保证模型的精度等优势成为该领域的研究热点。

隐式曲面建模计算得到的隐式面光滑、整体性强,但难以充分地描述局部复杂的地质构造特性^[11],难以精确地表达地质构造的局部变化特征。因此,针对含复杂地质构造的矿区进行三维地质建模时,需对复杂地层情况分类处理,进行数据预处理标准化等操作。基于此,杜子纯等^[12]提出了一种基于钻孔数据,通过添加零厚度层,对地层中的倒转、缺失、重复等特殊情况的处理方法;花卫华等^[13]引入逻辑钻孔递归统一地层层序思想来计算零厚度层的插入位置,统一钻孔的地层序列及修正标准地层层序,有效解决了倒转现象;Tacher等、Murray等^[14-15]基于统计概率理论处理侵蚀关系;也有学者提出一种简化复杂地层的方法,通过构造虚拟界面将包含各种复杂地质构造的复杂地质体转化为简单层状地质体^[16-17]。针对断层建模,李林等^[18]提出一个由面成体的“构造镶嵌”地质建模的技术流程,花卫华等^[19]提出一种基于断裂恢复理论的复杂断裂网络建模方法,可以有效地提高复杂断裂条件下三维地质建模的效率与准确性。

本文介绍一种适用于煤矿区域复杂地质构造的隐式建模方法。该方法分别针对侵入岩、采空区和断层等3种复杂构造提出了相应的数据规则化处理及隐式建模特征点特征向量提取方法,并基于HRBF隐式建模方法^[20-21],提出了一种针对煤矿区域实现拓扑一致三维地质建模的方法,增强了HRBF方法对不同类型地质构造建模的适用性,实现了煤矿区域复杂地质构造的建模。

1 特征点与特征向量的提取方法

准确地确定各类构造和地层的特征点与特征向量是计算隐式地质界面的前提。然而,针对火成侵入岩、采空区、断层等复杂构造情况,直接应用现有基于钻孔数据的特征点提取方法^[20]存在无法正确解算隐式面的问题。因此,本文提出了一种新的特征点提取方法,以保证应对各种复杂地质结构时,隐式面解算的准确性。

1.1 火成侵入岩特征点的提取方法

火成侵入岩是指由岩浆侵入地壳内部的岩层或裂缝,通过冷却凝固形成的一种岩石。这种类型的构造信息通常包含在钻孔数据中。火成侵入岩在地下的赋存情况非常复杂,可能具有多样的侵入分支和形态,具体表现为,同一个钻孔中可能会出现两层或两层以上的侵入岩地层(如图1所示)。这种特点使得在隐式建模过程中直接提取特征点来解算隐式面变得困难。

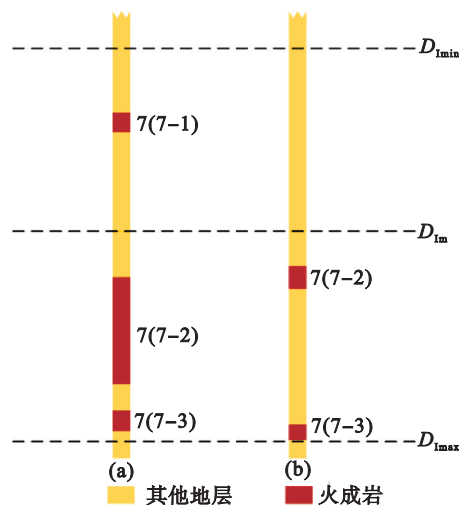


图1 侵入岩在钻孔中的表现及编号原理图

Fig. 1 Performance of intrusive rocks in drill holes and numbered schematic diagrams

本文提出了适用于火成侵入岩的隐式建模方法。首先,对多层侵入岩进行分层;其次,针对每层侵入岩,分别提取其隐式特征点和特征向量;最后,对每层侵入岩解算其隐式面,并将所得到的各层隐式面进行组合,从而得到完整的侵入岩的隐式表达。具体算法流程如下:

1) 首先根据钻孔数据提取侵入岩所有的上下界面点,得到侵入岩在建模区域的深度范围 $D_{\text{imax}} \sim D_{\text{imin}}$ 。考虑到钻孔中的第一层侵入岩可能发生在临近最深 D_{imax} 处,则将该层与其他钻孔中邻近 D_{imax} 处的侵入岩(可能并非第一层)相连更为合理,因此需确定1个用于整体分层的临界深度(即平均深度),本文利用式(1)计算临界深度 D_{im} ,

$$D_{\text{im}} = \frac{D_{\text{imax}} + D_{\text{imin}}}{2} \quad (1)$$

2) 对钻孔中的侵入岩进行单独编号,原理如图1所示。对钻孔中的侵入岩从上至下依次进行唯一标识,于是出现2种情况:①钻孔中第一层侵入岩在 $[D_{\text{imin}}, D_{\text{im}}]$ 之间,如图1a所示,则按该钻孔中含侵入岩层数从上至下按顺序依次编号;

②该钻孔中第一层侵入岩在 $(D_{lm}, D_{lmax}]$ 之间,如图1b所示,则从地层7-2开始从上至下编号.

3) 对每层侵入岩单独提取建模特征点及特征向量.以一层为例,首先遍历每个钻孔,若含有该层侵入岩,则提取该层层顶作为上界面隐式特征点,层底作为下界面隐式特征点;若不含该层,则提取钻孔孔顶作为特征点.所有的特征向量均为竖直向上.值得注意的是,为使建模结果更加合理,对于第一层的上界面隐式点,仅提取含有第一层侵入岩的钻孔.

4) 利用基于钻孔数据的 HRBF 隐式建模方法^[20],根据每层侵入岩的特征点解算对应的隐式面,再进行组合即得到侵入岩的隐式模型.

1.2 采空区特征点的提取方法

采空区是由于人工挖掘或天然地质运动在地下形成的洞穴,本文主要考虑煤层采空区.采煤方法种类很多,主要划分为壁式和柱式两大类,包括长壁采煤法、阶段开采法、房柱采煤法等.使用不同的采煤技术、采煤方法形成的采空区形态也不同,与地下煤层赋存形态类似,采空区总体呈现出扁平的形态,因此探测得到的采空区轮廓数据也呈现扁平的椭圆状分布,如图2所示.

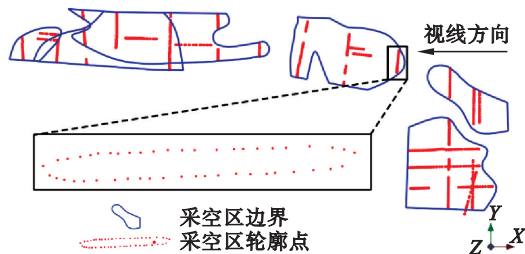


图2 采空区数据
Fig. 2 Goaf data

采空区数据包括采空区边界和轮廓数据,用于描述采空区在某一区域中的位置和几何形状特征.其中,边界数据用于描述采空区在该区域的平面相对位置,而轮廓数据则通过电磁剖面数据解释提取而得,在某一纵向剖面(电磁测线)上描绘出采空区与该剖面相交的轮廓.

采空区与侵入岩的特征点提取方法类似,均采用确定建模顺序、提取上下界面特征点、分层解算和组合隐函数等步骤来获得最终的隐式模型.具体的流程如下:

首先,根据采空区边界点以及采空区轮廓点的位置关系,确定采空区轮廓的连接区域及同区域下的采空区建模顺序.

然后,按顺序提取各区域各层采空区的隐式建模特征点,特征点由采空区轮廓点得到.与钻孔数据中某一地层上下界面点的易提取性不同,在提取前采空区轮廓点之前,需要划分每组椭圆状轮廓点的上下界:

①获得位于该椭圆两端的点(本文称为极点),将轮廓点投影到 $X-O-Y$ 平面上,则可拟合为1条直线,随后获取该组轮廓点中 X 坐标和 Y 坐标的最大、最小值 $MaxX, MaxY, MinX, MinY$.再根据式(2)计算方向参数 d ,判断拟合直线为 X 轴方向或 Y 轴方向: $d > 1$ 则为 X 轴方向,因此轮廓点中 X 坐标最大和最小的2个点为极点;反之为 Y 轴方向,即轮廓点中 Y 坐标最大与最小的2个点为极点.

$$d = \frac{MaxX - MinX}{MaxY - MinY} \quad (2)$$

②连接轮廓线的2个极点,并判断其他轮廓点相对于这条连线的位置,将轮廓点分为上界面和下界面特征点.其中,上界面特征点的特征向量朝下方,而下界面特征点的特征向量朝上方(见图3).需要注意的是,2个极点既作为上界面特征点,也作为下界面特征点.

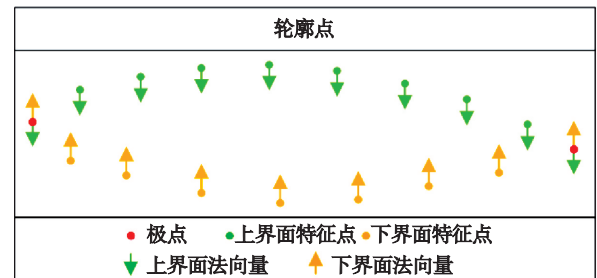


图3 提取采空区上界面、下界面的特征点
Fig. 3 Extraction of feature points at the upper interface and lower interface of the goaf

最后,依据采空区建模特征点,采用与侵入岩建模一致的步骤即可建立各区域最终采空区的隐函数表达.

1.3 断层建模特征点的提取方法

断层是地层受力发生断裂并沿断裂面发生相对位移的构造,断层数据包括断层面数据以及断层错动数据.断层面数据用以描述断层面的相对位置信息,包括描述相对位置的断层点及空间形态的产状;断层错动数据则用于描述断层作用在地层的错动信息,包括正逆断层标识及用于描述错动大小的错动距离数据.实际上断层面只是一种虚构的概念,它是由两部分块体通过相对滑

动所形成的界面.因此,在进行断层建模时,如何正确地相对错动的地层进行建模,以准确反映断层面的特性是至关重要的.

首先,提取断层面隐式建模特征点及特征向量以计算断层面的隐式函数.采用与基于 PRB (point, routing, boundary) 数据的隐式建模^[21]的类似方法,提取断层线的点作为特征点,利用产状数据计算特征点的特征向量,产状数据包括倾角 α 及倾向角 β , 利用 β 、 α 计算特征向量 $\mathbf{n}(x_n, y_n, z_n)$ 的方法如式(3)所示:

$$\left. \begin{aligned} x_n &= \sin \beta, \\ y_n &= \cos \beta, \\ z_n &= \frac{1}{\tan \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

随后,使用 HRBF 计算方法得到断层面的隐函数表达,结果如图 4 所示.

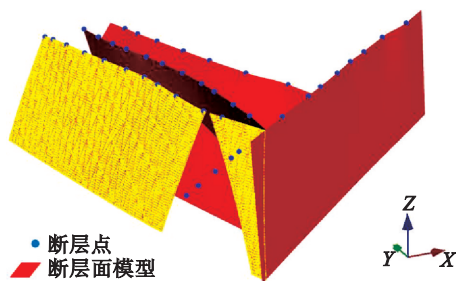


图 4 基于 HRBF 的断层面结果

Fig. 4 Fault surface results based on HRBF

最后,计算断层作用后的地层隐函数表达.为获得断层错动的结果,结合断层的隐函数表达,本文提出分区加入断层约束点的方法来分区计算地层隐函数,具体步骤如下:

1) 执行隐式建模步骤,提取各地层隐式特征点,计算不加断层约束时的地层初始隐函数.

2) 确定断层面的切割顺序,利用断层面将建模区域分成若干区域.对每一个区域单独计算断层作用影响下的地层隐函数.如图 5 所示,以区域 1 的地层 1 为例计算断层影响下的地层隐函数.设该区域由逆断层 S_1 切割得到,倾向指向该区域,错动大小为 δ ; 地层 1 特征点集为 $\{P_{im1}, P_{im2}, \dots\}$.

具体步骤如下:

①根据断层的切割关系,找到与区域 1 相关的断层面 S_1 .

②结合断层点及产状计算地层 1 在 S_1 作用前的断层错动隐式点(图 5):采用二分法,计算每个断层点沿断层面下移后与地层 1 相交位置处对应

的断层错动点.断层错动点是指断层错动发生前,地层与断层面的交点.

③结合断层属性、断距及产状计算地层 1 在断层 S_1 作用后的错动特征点 P_f (图 5),错动特征点是指在断层作用下,地层与断层面的实际交点.根据断层的正逆属性与断层错动值,将每个断层错动点沿产状方向上移或下移 $\delta/2$,例如在图 5 中,断层为逆断层,而该区域为断层的上盘,因此断层错动点应上移 $\delta/2$ 得到错动特征点 $\{P_{f1}, P_{f2}, \dots\}$.

④将错动隐式点集与地层 1 隐式点集结合,得到断层 S_1 影响下地层 1 隐式面的特征点集 $\{P_{im1}, P_{im2}, \dots, P_{f1}, P_{f2}, \dots\}$,所有特征点的特征向量均竖直向上,随后重新计算隐函数,得到地层 1 错动隐式面.

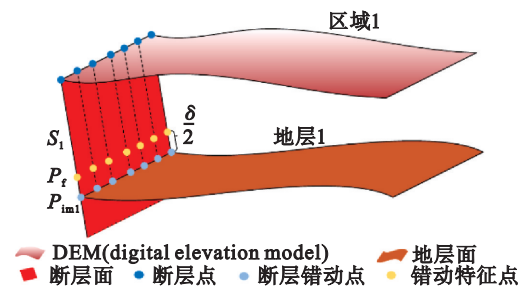


图 5 断层错动隐式点计算原理

Fig. 5 Principle of calculating fault misalignment implicit points

上述为区域 1 中 1 个地层的计算方法,对区域 1 其他地层重复以上方法和步骤,得到区域 1 中断层作用下的其他地层面.使用相同的方法对剩下区域进行逐层计算,得到断层影响下所有区域的地层隐函数,再将各区域中对应地层进行组合,即可得到整个区域所有地层及断层错动的隐式表达.

2 构造模型与地层模型集成

根据上述特殊构造隐式建模特征点提取方法,本文采用基于钻孔数据的 HRBF 隐式建模方法^[20]实现复杂构造与地层模型的集成,整体建模流程如图 6 所示.对于煤矿区复杂构造与地质体的集成三维建模,应以钻孔数据为基准数据,建立体现断层约束的地层模型,并在局部集成侵入岩.

值得注意的是,隐函数无法直接在计算机中进行三维显示,需采用一定的可视化方法将隐函数表达的复杂构造及地质体构建成可绘制的几

何网格.本文采用移动四面体^[22]方法对复杂地质体的隐式模型进行网格化表达.

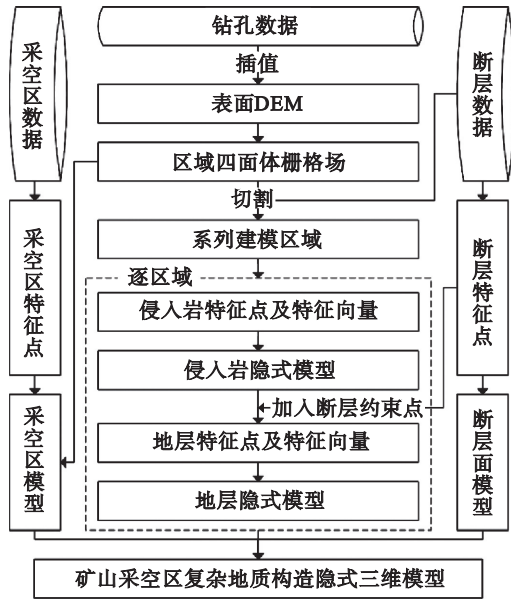


图6 复杂区域自动隐式建模流程

Fig. 6 Automatic implicit modeling process for complex regions

本文设计的复杂地质体拓扑一致集成建模流程如下.

1) 区域四面体栅格场构建:以钻孔为基准数据,首先根据所有钻孔的孔顶坐标,采用一定精度插值加密地表点并生成DEM,然后利用三角网向下延伸至建模深度并生成三棱柱,最后将三棱柱分解为四面体得到初始区域四面体栅格场.

2) 将构造及地层的隐式表达函数作用于四面体栅格场,按照采空区、断层、侵入岩、地层的顺序,构建复杂构造及地层的网格模型.由于所有的隐函数表达均作用于同一个四面体栅格场,因此建立的最终模型无拓扑错误.

3 案例实验分析

基于以上侵入岩、采空区以及断层等复杂构造的隐式特征点提取方法,本文基于C++语言和Qt应用程序框架,开发了矿区复杂构造与地层集成三维建模软件.软硬件环境参数为:AMD Ryzen9 5900HX 3.3 GHz CPU, NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU, 16 GB 内存,以及 Windows11 (64位).

本文将该方法应用于山东省济南市轨道交通8号线沿线区域三维地质建模,8号线地铁建设深度为距地面20 m.

3.1 研究区概况

研究区位于山东省济南市,华北平原东南部边缘,南依泰山、北跨黄河,地质构造总体上是以古生代地层为主的北倾单斜构造^[23].研究区北部有广泛的岩浆活动,在该区域内也发生了岩浆侵入构造;由于岩浆活动,形成了大量的断裂.同时,研究区内矿产资源丰富,主要为煤矿,开采历史悠久,地下采空区情况复杂,空间位置如图7所示.

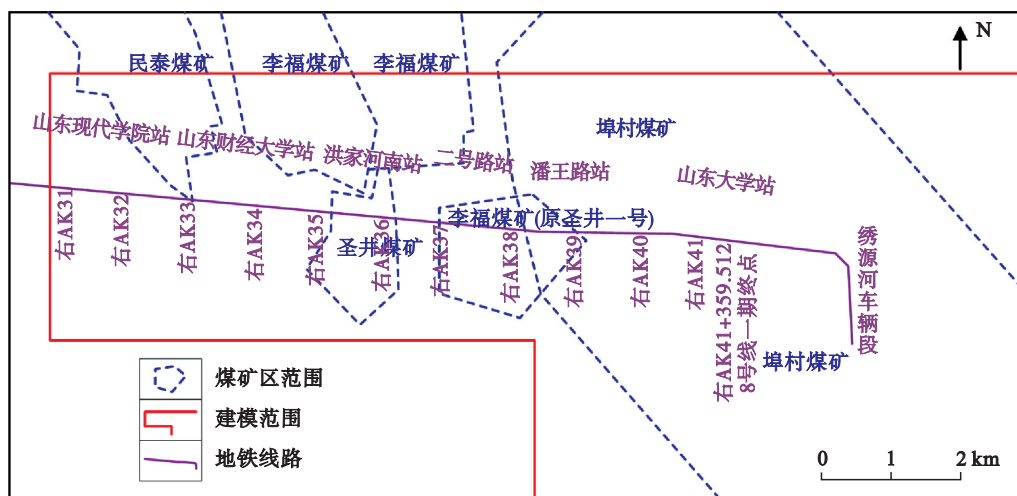


图7 研究区域内煤矿分布图

Fig. 7 Coal mine distribution map in the study area

3.2 研究区数据

研究区内地质构造复杂,本文获得的建模数据包括钻孔数据(包含侵入岩信息)、采空区数据

以及断层数据,如图8所示.区域内共涉及地质钻孔43个,地层数为27层,采空区2块(3煤采空区及9煤采空区)以及断层线6条(F1, F2, F3,

F4, F5, F6).

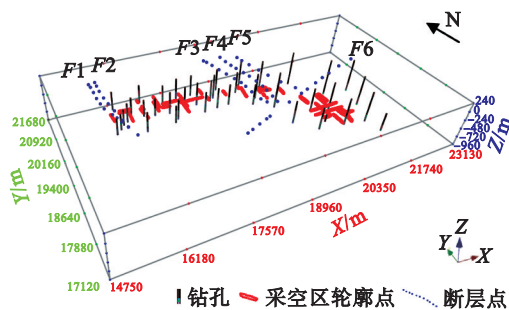


图8 建模数据

Fig. 8 Modeling data

3.3 模型建立

应用本文方法建立的研究区复杂地质体集

成模型如图9所示.模型直观地表达了区域中复杂构造的形态以及断层控制下的地层沉积特点.沿钻孔剖面进行分析可得,除钻孔中无法体现的采空区外,本文方法建立的复杂构造区域三维模型与钻孔揭露的地层(包括侵入岩层)信息完全吻合.侵入岩、采空区、断层等特殊构造的建模结果如图10所示,建模结果与数据吻合程度良好,并且基于建模结果分析可得,本文方法能够快速有效地建立侵入岩、采空区及断层模型,并且充分表达其空间形态.利用本文方法,能够准确地模拟出侵入岩的侵入分支形态,采空区模型的边界和轮廓也与实际数据相吻合,不仅能够建立断层面模型,也能建立受断层错动作用后的地层模型.

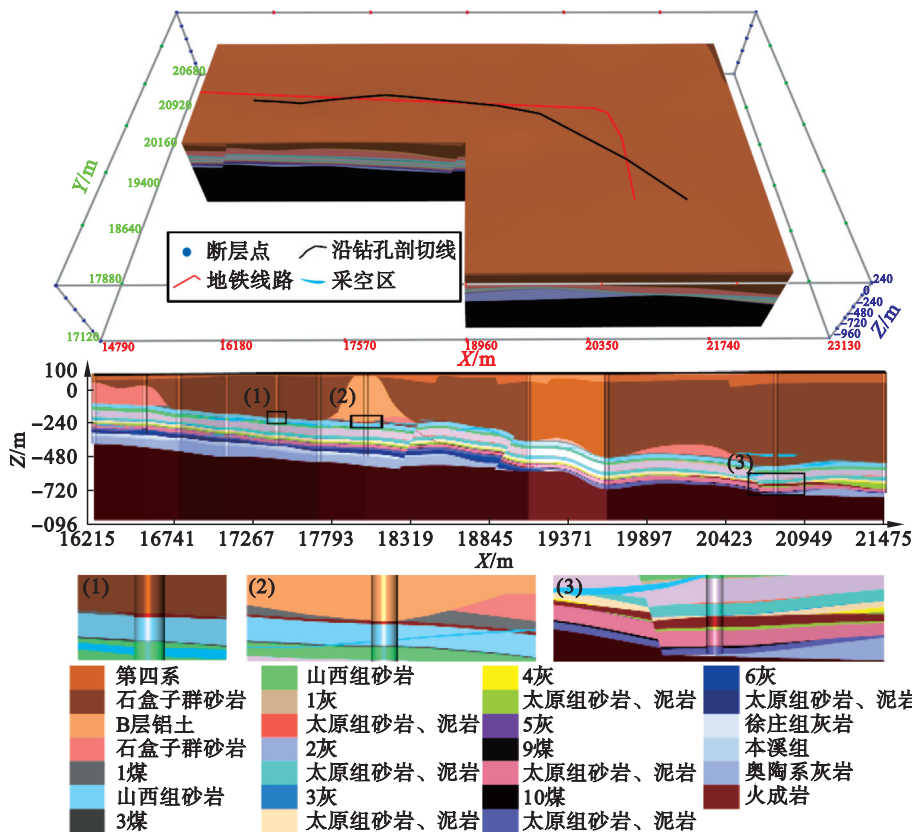


图9 模型结果及沿钻孔剖面

Fig. 9 Model result and profile along the borehole

基于建立的三维集成模型和剖切分析,可以实现任意位置的地层构造信息查询及剖面显示.从地铁8号线沿线剖面及采空区、煤层模型(图11)中可以清晰得出多个煤层与其他地层的空间关系,采空区的位置也与煤层区域相符合.根据模型分析可得地铁线路穿过4层煤层,采空区几乎遍布该线路区域内的整个路段;基于模型进行测量也可得到,离地面最近的采空区距地面270 m左右,整体采空区分布在高程-160~-800 m之间,

主要集中在-160~-500 m的区域,整体采空区平均厚度为20~30 m,最厚区域达到60 m,发生在地铁线路末端,距离地面460 m;同时地铁线路也经过了断层F1, F2, F3, F4, F5, F6,即经过了该区域中的所有大断层,因此,复杂的采空区及断层分布情况在地铁工程施工前及施工期间需要重点考虑.

值得一提的是,即使在断层恰好穿过钻孔中某个地层分界点的情况下(如图12中的红框所

示),本文提出的方法仍能够准确建立三维地质模型.从图12的建模结果可以得出,当钻孔与断层面相交时,建模结果依然与钻孔一致,没有发生错动.由于钻孔是利用钻探设备向地下钻取直径较小、深度较大的柱状土壤再加以分析而得到的数据,是一种强解释数据,能够直接反映钻孔处地层的分布情况.因此,对于钻孔与断层相交的情况,正确的建模顺序应先遵循钻孔数据,再考虑断层错动的建模,建立的模型才能符合实际情况.

3.4 模型质量评价

三维地质模型是对实际地质现象的近似.由于地质本身的复杂性和多样性、数据的不确定性和有限性、建模方法的随机性和不确定性,构建出的三维地质模型不能完全准确地表达客观地质实体,因此为了验证方法的工程适用性,需要对三维地质模型的精度进行质量评价.

本文采用基于钻孔数据的三维地质模型的质量评价方法,具体步骤为:建模时预留一部分真实钻孔,然后从三维地质模型上相同位置处提取虚拟钻孔,通过计算虚拟钻孔与真实钻孔的吻合程度作为模型对应点的可信度.吻合程度的计算方法为:计算真实钻孔和模型钻孔的重叠部分和未重叠部分,使用重叠部分的厚度除以真实钻孔的实际深度即可得到虚拟钻孔与真实钻孔的吻合程度.如图13所示,真实钻孔的深度为 L ,重叠部分为 $a+b+c+d+e$,则模型在该钻孔位置处的可信度为 $(a+b+c+d+e)/L$.

本次建模预留了5个钻孔,再用剩余的38个钻孔数据进行建模,模型建立完成后,在预留钻孔位置处提取虚拟钻孔.将虚拟钻孔与真实钻孔进行对比(图13),计算出每个钻孔位置处模型的可信度分别为81.73%,76.47%,87.60%,84.53%,85.19%,在钻孔位置处的平均可信度达到了83.10%.可见模型的可信度达到了80%以上,说明本文的建模结果与工程认可的结果有较高的匹配度.

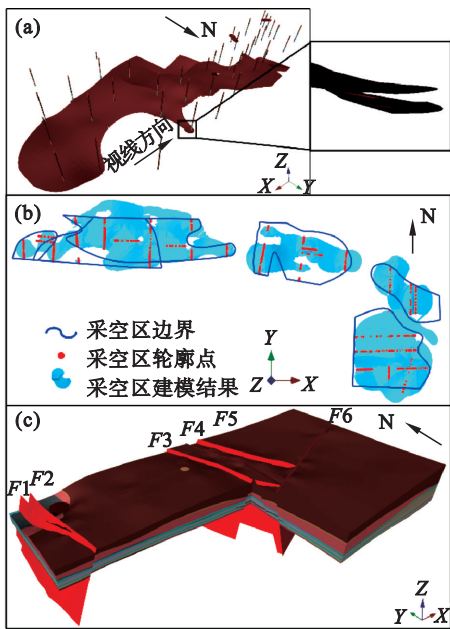


图10 侵入岩、采空区、断层模型结果

Fig. 10 Results of intrusive rock, goaf and fault model

(a)—侵入岩模型; (b)—采空区模型; (c)—断层模型.

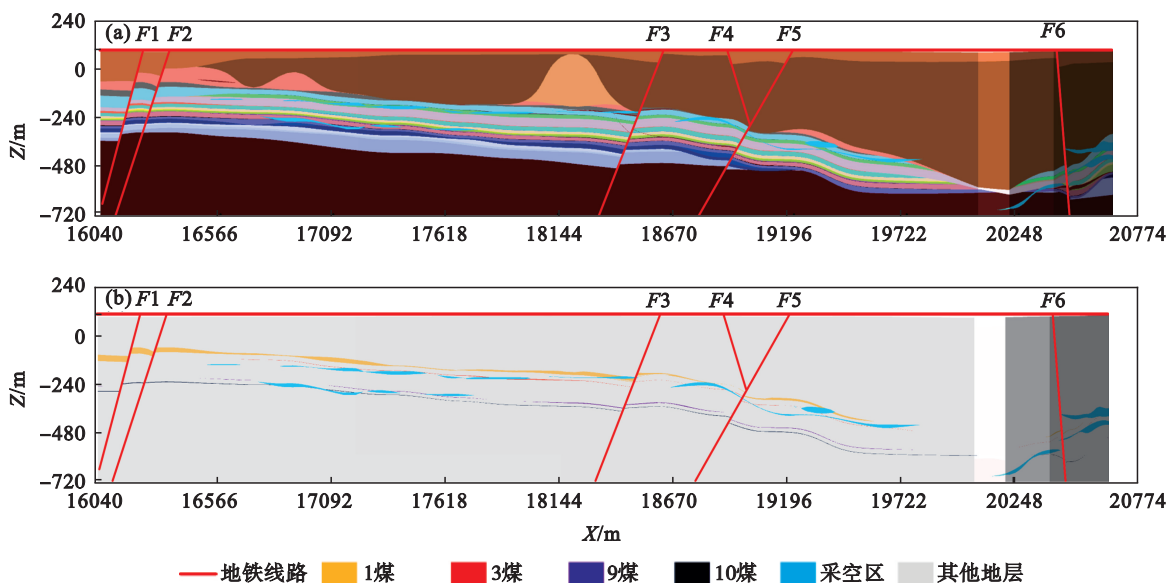


图11 地铁线路剖面

Fig. 11 Subway line profile

(a)—原始剖面; (b)—煤层及采空区相对位置展示.

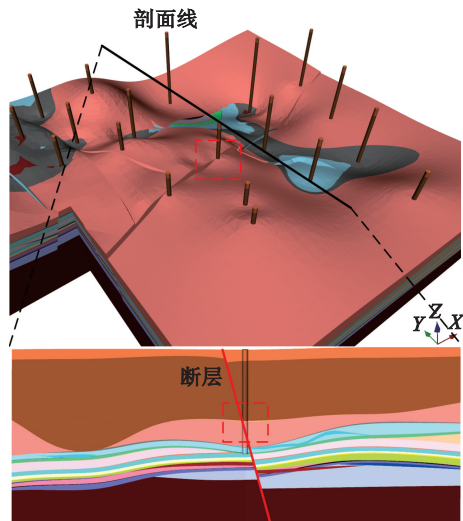


图 12 断层钻孔相交时建模结果

Fig. 12 Modeling results when fault boreholes intersect

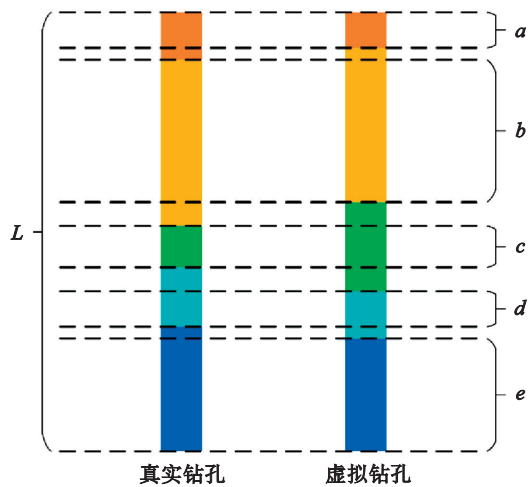


图 13 基于钻孔的模型质量评价原理

Fig. 13 Principles of borehole-based model quality evaluation

通过模型质量评价结果可以得出,本文提出的针对侵入岩、采空区、断层等复杂构造隐式三维集成建模方法建立的模型结果可信度较高,说明本文方法具有良好的工程适用性。

4 结 语

针对轨道交通与煤矿综合区域复杂地质情况的三维地质建模问题,本文综合考虑了多种类型复杂地质构造的空间形态及探测数据特征,提出了适用于不同类型构造的隐式建模特征点及特征向量提取方法,并基于 HRBF 隐函数实现了多种地质构造与地层、煤矿采空区的拓扑一致集成建模方法。针对济南市地铁 8 号线区域开展的建模实验结果表明,本文方法具有以下优势:

1) 能够准确合理地建立复杂地质构造三维模型,并与钻孔揭露的空间和属性信息一致;

2) 能够对复杂构造区域内的采空区、断层、钻孔等多源数据在统一尺度下构建拓扑一致模型;

3) 对于数据相冲突的地方,能够按照数据约束优先级自动建立更为合理的模型;

4) 复杂构造区域的三维地质模型及剖切分析,能够为地铁工程的线路规划及施工安全提供辅助决策和安全保障。

本文方法在以下方面仍需研究和改进:

1) 本文数据揭露的侵入岩及采空区模型相对较薄,因此建模时特征向量设置为竖直方向。对于较厚的采空区及侵入岩,应进一步考虑侵入岩及采空区的局部产状来赋予更为准确的特征向量。

2) 本文数据揭露了贯穿模型的主要断层,对于研究区的局部微小断层,需要结合更精确的探测结果进行更为细致准确的建模。

参考文献:

- [1] Houling S. 3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [2] Jessell M, Guo J T, Li Y Q, et al. Into the Noddyverse: a massive data store of 3D geological models for machine learning and inversion applications[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(1): 381-392.
- [3] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(4): 405-418.
- [4] Che D F, Wu L X, Yin Z R. 3D spatial modeling for urban surface and subsurface seamless integration[C]//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, 2009: III-392-III-395.
- [5] Saye R. Implicit mesh discontinuous Galerkin methods and interfacial gauge methods for high-order accurate interface dynamics, with applications to surface tension dynamics, rigid body fluid-structure interaction, and free surface flow: part II [J]. *Journal of Computational Physics*, 2017, 344: 683-723.
- [6] Mallet J L. GOCAD: a computer aided design program for geological applications[M]//Turner A K. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems. Dordrecht: Springer, 1992: 123-141.
- [7] 郑杨, 简季. 复杂地层结构三维地质建模空间插值方法研究[J]. *城市地质*, 2024, 19(1): 121-128.
(Zheng Yang, Jian Ji. Spatial interpolation methods for 3D geological modeling of complex strata structures [J]. *Urban Geology*, 2024, 19(1): 121-128.)
- [8] Zhong D Y, Wang L G, Bi L, et al. Implicit modeling of complex orebody with constraints of geological rules [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(11): 2392-2399.

- [9] 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.
(Guo Jia-teng, Wu Li-xin, Zhou Wen-hui. Automatic ore body implicit 3D modeling based on radial basis function surface [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41 (8) : 2130-2135.)
- [10] Guo J T, Wu L X, Zhou W H, et al. Section-constrained local geological interface dynamic updating method based on the HRBF surface [J]. *Journal of Structural Geology*, 2018, 107: 64-72.
- [11] Martin R, Boisvert J B. Iterative refinement of implicit boundary models for improved geological feature reproduction [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 109: 1-15.
- [12] 杜子纯,刘镇,明伟华,等.城市级三维地质建模的统一地层序列方法[J].岩土力学,2019,40(sup1):259-266.
(Du Zi-chun, Liu Zhen, Ming Wei-hua, et al. Unified stratigraphic sequence method for three-dimensional urban geological modeling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 (sup1): 259-266.)
- [13] 花卫华,郭丹阳,刘修国,等.含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方法[J].地球科学,2023,48(4):1532-1542.
(Hua Wei-hua, Guo Dan-yang, Liu Xiu-guo, et al. Unified correction and connection method of stratigraphic sequence with complex inversion [J]. *Earth Science*, 2023, 48 (4) : 1532-1542.)
- [14] Tacher L, Pomian-Szrednicki I, Parriaux A. Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(2): 212-221.
- [15] Murray A B, Gasparini N M, Goldstein E B, et al. Uncertainty quantification in modeling earth surface processes: more applicable for some types of models than for others [J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 90: 6-16.
- [16] Turner A K. Challenges and trends for geological modelling and visualisation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(2): 109-127.
- [17] 徐涛,徐果明,高尔根,等.三维复杂介质的块状建模和射射线追踪[J].地球物理学报,2004,47(6):1118-1126.
(Xu Tao, Xu Guo-ming, Gao Er-gen, et al. Block modeling and shooting ray tracing in complex 3-d media [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(6): 1118-1126.)
- [18] 李林,朱立峰,李政国,等.复杂断裂构造条件下城市地质三维建模方法研究[J].西北地质,2022,55(4):133-139.
(Li Lin, Zhu Li-feng, Li Zheng-guo, et al. Technology research on the constructing of urban geological 3D model in condition of complex faults [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 133-139.)
- [19] 花卫华,曾新灵,郭丹阳,等.基于构造恢复理论的含复杂断层三维地质建模方法[J].地球科学,2024,49(4):1411-1420.
(Hua Wei-hua, Zeng Xin-ling, Guo Dan-yang, et al. 3D geological modeling method based on tectonic restoration theory [J]. *Earth Science*, 2024, 49(4): 1411-1420.)
- [20] Guo J T, Wang X L, Wang J M, et al. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm [J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 106047.
- [21] Guo J T, Wu L X, Zhou W H, 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): 17.
- [22] Bagley B, Sastry S P, Whitaker R T. A marching-tetrahedra algorithm for feature-preserving meshing of piecewise-smooth implicit surfaces [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 163: 162-174.
- [23] 张耀国.济南城市轨道交通建设区三维工程地质建模与适宜性分区研究[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
(Zhang Yao-guo. Study on 3D geological engineering model and regionalization based on suitability in urban mass transit construction region, Jinan City [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.)

(上接第1251页)

- [20] Gey N, Petit B, Humbert M. Electron backscattered diffraction study of ϵ/α' martensitic variants induced by plastic deformation in 304 stainless steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(12): 3291-3299.
- [21] Saeed-Akbari A, Imlau J, Prah U, et al. Derivation and variation in composition-dependent stacking fault energy maps based on subregular solution model in high-manganese steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40(13): 3076-3090.
- [22] 宋仁伯,霍巍丰,周乃鹏,等.Fe-Mn-Al-C系中锰钢的研究现状与发展前景[J].工程科学学报,2020,42(7):814-828.
(Song Ren-bo, Huo Wei-feng, Zhou Nai-peng, et al. Research progress and prospect of Fe-Mn-Al-C medium Mn steels [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(7) : 814-828.)
- [23] Allain S, Chateau J P, Bouaziz O, et al. Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 387/388/389: 158-162.
- [24] Frommeyer G, Brück U, Neumann P. Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes [J]. *ISIJ International*, 2003, 43 (3) : 438-446.
- [25] 闫翠,李麟,符仁钰,等.TRIP钢的研究进展[J].上海金属,2008,30(4):40-44.
(Yan Cui, Li Lin, Fu Ren-yu, et al. A review on research progress of trip steel [J]. *Shanghai Metals*, 2008, 30(4): 40-44.)
- [26] Koyama M. Twinning-induced plasticity (TWIP) steel [M]// Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys. Amsterdam: Elsevier, 2022: 95-105.
- [27] 李亦庄,黄明欣.基于中子衍射和同步辐射X射线衍射的TWIP钢位错密度计算方法[J].金属学报,2020,56(4):487-493.
(Li Yi-zhuang, Huang Ming-xin. A method to calculate the dislocation density of a TWIP steel based on neutron diffraction and synchrotron X-ray diffraction [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 487-493.)
- [28] Gray G T. High-strain-rate deformation: mechanical behavior and deformation substructures induced [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2012, 42: 285-303.
- [29] Fan H D, Wang Q Y, El-Awady J A, et al. Strain rate dependency of dislocation plasticity [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1845.
- [30] 李春光,张伟,刘立现,等.不同应变速率双相高强钢动力学行为微观机理分析[J].锻压技术,2018,43(6):166-171.
(Li Chun-guang, Zhang Wei, Liu Li-xian, et al. Analysis on micro-mechanism of dynamic mechanical behavior for high-strength steel with dual-phase under different strain rates [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (6) : 166-171.)