

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.04.014

基于三维剖面的复杂地质体显式自动建模方法研究

张 源, 朱俊凤, 刘 敬, 陈浩权, 肖艳云

ZHANG Yuan, ZHU Jun-Feng, LIU Jing, CHEN Hao-Quan, XIAO Yan-Yun

广东省地质调查院, 广东 广州 510080

Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, Guangdong, China

摘要:本文提出了一种以三维地质剖面为基础数据,结合地表地形、断层、地质图等数据强约束,实现复杂地质体显式自动建模的方法。该方法支持对断层交错、褶皱、侵入岩、火山通道等可能造成水平地层单元破碎、垂向多解和倒序的复杂地质构造的处理和构建,并能通过数据属性参数调整,在一定程度上实现对建模结果的人工干预。本文详细介绍了该方法的建模过程,包括建模数据准备及处理、构建断层分段面、构建框架(一级)地层模型、构建精细(二级)地层模型,并重点介绍了该建模方法解决的难点问题。应用该方法,采用平行剖面分块方法,将广东省陆域范围分割成条带状区域,然后以每个条带状区域为初始建模单元进行三维地质建模,最后将各条带三维模型无缝拼接,首次得到整个广东省1:25万基岩三维模型。该方法能够为大范围复杂地质体快速建模提供借鉴。

关键词:三维地质剖面;平行剖面;复杂地质体;显式自动建模;广东省

中图分类号:P285

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2023)04-0733-13

Zhang Y, Zhu J F, Liu J, Chen H Q and Xiao Y Y. 2023. Research on Explicit Automatic Modeling Method of Complex Geological Body Based on Three-dimensional Profile. *South China Geology*, 39(4):733–745.

Abstract: This paper presents an explicit automatic modeling method for complex geological bodies based on 3D geological profile data and combined with strong constraints of surface topography, faults, geological maps and other data. This method supports the processing and construction of complex geological structures that may cause horizontal stratigraphic unit breakage, vertical multiple solutions and inversion, such as fault interlacing, folds, intrusive rocks, volcanic channels, etc., and can achieve human intervention on modeling results to a certain extent through the adjustment of data attribute parameters. The modeling process of this method is introduced in detail, including the preparation and processing of modeling data, the construction of fault segmentation plane, the construction of framework (primary) stratum model, and the construction of fine (secondary) stratum model. The difficult problems solved by this modeling method are highlighted. The land area of Guangdong Province is divided into strip areas by using this method together with the parallel profile dividing method, and then 3D geological modeling is carried out in each strip area which is regards as the initial modeling unit. Finally, the 3D geological models of each strip are seamlessly spliced, and the 1:250000 bedrock 3D model of the whole Guangdong Province is obtained for the first time. This method can

收稿日期:2022-12-6;修回日期:2023-3-8

基金项目:广东省自然资源厅城市地质信息管理服务平台建设(项目编号:[2021]-2)

第一作者:张源(1975—),男,高级工程师,主要从事地质信息化、三维地质建模等研究与应用,E-mail:154962@qq.com

provide a reference for rapid modeling of large-scale complex geological bodies.

Key words: 3D geological profile; Parallel profiles; complex geological body; explicit automatic modeling; Guangdong Province

当前主流的显式地质体三维建模方法大体可以概括为基于控制性钻孔的自动建模和基于三维剖面的半自动交互建模,前者建模速度快、效率高,不需要太多的人工干预(朱良峰等,2004;郭艳军等,2009;林冰仙等,2013;王国光等,2022),但钻孔数据不能很好地体现地下断裂、褶皱、相变等较复杂地质构造的空间展布情况。此外,对于大范围精细建模中常见的地层互层、倒转等容易出现多解性的地质现象,进行计算机辅助地层标准化时通常会使问题复杂化,自动插值效果有时与地质认识不符甚至相悖(王丹,2012;程春,2017;冉祥金,2020);三维剖面交互建模理论上可以解决任意复杂地质结构的构建问题,建模结果可以完全符合专业人员的地质认识,但建模过程,包括前期的数据准备和后续的建模操作,复杂繁琐,当地质情况复杂、建模范围较大时,需要大量的人力、物力投入,实际模型成果也非常依赖实施人员的地质认识、三维 GIS 知识和软件操作能力,不利于后续模型更新维护(刘顺昌等,2021;张源,2021;韩洒,2022;马朝阳等,2022)。

为突破上述建模方法的局限性,在一定程度上兼顾自动建模的建模效率和剖面建模对复杂地质形态的表现能力,本文提出一种以三维剖面为主要数据源的自动建模方法,尽可能充分利用地质剖面图所提供的地层产状、构造信息,并结合 DEM、地表平面地质图、断层平面分布等数据强约束,使建模结果尽可能趋近地质剖面所表达的地下地层形态特征,同时降低人机交互成本,尽可能避免三维空间的人机交互操作,提高复杂地质体的建模效率。

事实上,剖面线数据并不是非常良好的可用于空间插值的建模数据,想要以显式插值实现剖面自动建模,需要剖面密度较高、分布均匀、剖面上地质构造情况相对比较简单,地层接近水平层状,并且剖面间地层对应情况良好(王波等,2021;王丽坤等,2022;王荣亮等,2022;郑小杰等,2022;朱宇辰

和李茜,2022)。此外,在此前的剖面自动建模探索中较少使用更多的约束数据参与模型构建(Tao Z G et al.,2021;贾梅和刘星,2022;曾敏等,2022)。为适应更普遍的建模需求,本文尝试提升剖面表达的地层复杂度,增加对特定情况下的复杂断层交错、褶皱、侵入岩、火山通道等可造成水平向地层单元破碎、垂向多解和倒序地质构造的处理和支持,引入地质图、平面断层控制地层构造走向和平面分布,使建模结果尽可能贴合建模数据和专业人员的地质认识。

本文详细介绍了该方法的建模过程,包括建模数据准备及处理、构建断层分段面、构建框架(一级)地层模型、构建精细(二级)地层模型,并重点介绍了该建模方法解决的难点问题。以 4 km 为间距布置北西向平行剖面,将广东省陆域范围分割成等宽不等长的条带状区域,然后应用该方法,以每个条带状区域为初始建模单元进行三维地质建模,最后将各条带三维模型无缝拼接,得到整个广东省 1:25 万基岩三维模型。该方法能够为大范围复杂地质体快速建模提供借鉴。

1 建模过程

建模过程从操作上主要分为数据与预处理、模型构建两大部分,从流程上可以划分为建模数据准备及处理→地层分类→模型构建,模型构建又可细分为构建断层分段面→构建框架(一级)地层模型→构建精细(二级)地层模型。基本建模流程如图 1。

模型构建的总体思路是通过研究、总结剖面和地质图上地层形态结构特征,结合单元格交互建模对于广域建模分而治之的操作方案(雷传扬等,2022),以及自动建模多级地层分级约束的思路(许国等,2022),筛选相邻剖面上的断层线和贯穿整个剖面的地质界线,结合平面断层线和地质图上地质界线,按照线倾向自动生成垂向的分段曲面,将建模区域划分为类似单元格的分块,再在分块内使用

接近水平走向和接近垂直走向的地质体的地层界线逐级细分,按照上下叠覆关系依序构建,直至所有地质块体生成完毕。

1.1 建模数据准备及处理

建模数据的准备主要是对参与建模的地质剖

面图、地质图、断层线、DEM等数据进行标准化和一致性处理,解决各个数据内部和不同数据之间的逻辑冲突、坐标差异和空间拓扑错误,并借助MapGIS三维数据生产工具进行三维化,为之后的建模做准备。

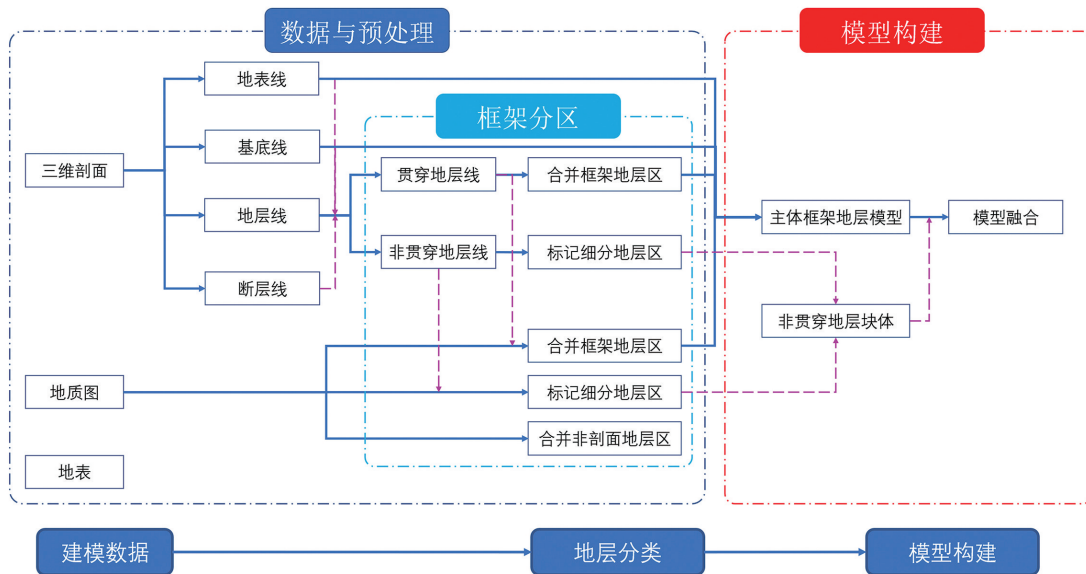


图1 基本建模流程图

Fig. 1 Basic modeling flow chart

1.1.1 数据标准化处理

参与建模的空间数据,包括地质图、断层线、地表地形数据以及地质剖面图等,需转换为矢量数据并具有统一坐标系和投影参数。因此对于不满足要求的数据,需进行坐标系转换、投影变换、空间校正和比例尺统一等,以保证各个数据所描述的空间位置相同。

平面地质图、地质剖面图等,需按照最新的区域地质背景建立标准地层,并将地层属性挂接到数据属性中。平面地质图的最小地质单元要满足精度需求,且数据为最新数据,如没有现成数据,还需考虑重新编图。如本次三维地质建模实践中,广东省没有已编制好的全省1:25万地质图,因此部署了1:25万地质图更新编图,最小地质单元到组。地质剖面图为图切剖面,根据地质图上剖面线位置,参考已有钻孔数据、地质图上产状信息、断层信息等,绘制地质剖面图。

此外,为满足后续数据三维化的需要,需对地质剖面图补充钻孔中心线和地层线图层,其中钻孔中心线需包含正确的三维坐标信息,地层线应包含边界线类型的说明。钻孔中心线是指剖面首尾两端的垂直线,钻孔中心线位置与地层线中边界线重合且不能超出地表线及基底线,坐标值必须与图面切线两个端点坐标一致,标高与实际高程一致,以保证后续计算的比例尺正确,每根钻孔中心线只保留两个端点共两行数据。表1、表2分别为剖面地层线和钻孔中心线的属性结构及要求。

1.1.2 数据三维化

在后续建模中,将使用三维数据进行插值,因此,数据准备完成后,使用MapGIS提供的数据三维化工具进行三维数据的生成。二维剖面根据剖面起点、终点的横纵坐标和海拔高程,系统自动导入三维场景生成三维剖面;地表平面数据,包括平面地质图、地表地形数据、断层平面分布数据,可根据

表 1 剖面地层线属性结构说明

Table 1 Description of profile stratigraphy attribute structure

数据项名称	定义或描述	数据类型及长度	是否必要
统一编号	按要素类规定要求编号	长整型,长度 10	是
边界类型	地层线的边界分类名称	字符串,长度 20	是
线方向	地层线的倾向说明	长整型,长度 10	是
断层编码	地层线上断层线所对应断层的编码	字符串,长度 20	是

表 2 剖面钻孔中心线属性结构说明

Table 2 Description of attribute structure of section drilling center line

属性名称	定义或描述	数据类型及长度	是否必要
统一编号	按要素类规定要求编号	长整型,长度 10	是
钻孔编码	钻孔的唯一编码	字符串,长度 20	是
横坐标	钻孔东西方向实地坐标	双精度,长度 32	是
纵坐标	钻孔南北方向实地坐标	双精度,长度 32	是
孔口标高	孔口海拔高程(m)	双精度,长度 32	是

地表高程数据插值生成三维数据。图 2 为广东省三维剖面 and DEM 数据叠加显示效果图。

为简化上述数据生产过程,提高数据生产效率,结合地质专业人员在实际数据生产中软件使用习惯,在项目实践中开发了一系列小工具用于辅助上述数据的生产,包括用于剖面框架生成的图切剖面工具;用于剖面必要图层生成、属性标准化、边界识别提取、断层属性关联的剖面预处理工具组;用于断层交错关系自动判断和排序的断层排序工具;用于控制三维数据在空间中移动和缩放的数据移动和比例变换工具;用于实现二维、三维剖面互转以便于剖面编辑的剖面转换工具等。在这些辅助工具的帮助下能更方便地进行建模所需数据的生产,数据结果也更加标准规范。

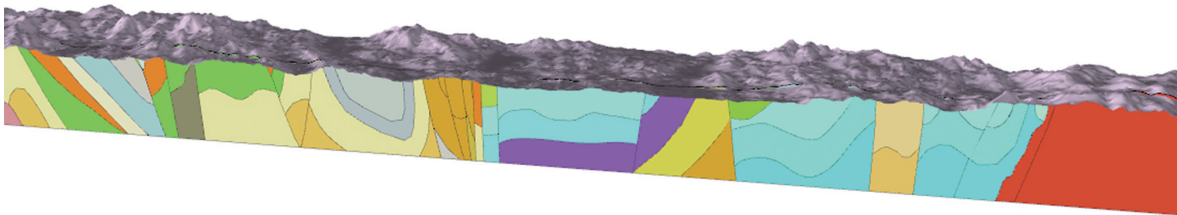


图 2 广东省三维剖面 and DEM 数据叠加显示效果图

Fig. 2 Superimposed display effect of 3D profile and DEM data in Guangdong Province

1.1.3 数据一致性检查校正

由于数据编制时间、编制方法、测量精度、插值精度等数据生产、编辑过程不可避免地会造成数据误差,因此需对数据一致性进行检查校验。数据一致性校验包括空间范围的一致性检查、必要属性结构及其属性值的完备性以及数据间关联属性的一致性检查、地质图上地质界线及其地层属性与剖面图上对应地层的一致性检查、地表地形面与三维剖面地表线形态一致性检查、剖面底部高程误差检查等。空间范围一致性要求所有参与建模的数据坐标

系一致并正确。必要属性结构及其属性值的完备性是指重要数据,如剖面地质区、地质线、断层线、轨迹线、断层平面分布线等数据的属性结构是否符合要求,属性项有无缺漏或错误。对于不符合要求的数据,要修改直到符合要求。数据间关联属性的一致性检查是指关联数据的属性是否匹配问题,如剖面地表部分的地层分区要与地质图保持一致,剖面的地表高程要与建模区内地表高程数据保持一致。地质图上地质界线及其地层属性与剖面图上对应地层的一致性检查是指两者之间地层属性要保持一致。地表地形面与三维剖面地表线形态一致性检查是指两者是否在地表面上完全重合。剖面底部高程误差检查是指剖面底部高程是否为建模深度。

根据需求在项目实践中开发了相应的自动检查工具,可输出相应的检查报告,辅助数据生产人员了解数据问题并进行针对性修正。

1.1.4 人工干预属性处理

在实际建模过程中,为了在一定程度上引入专家经验和地质专业认识,在软件自动判断不够准确时能实现人工干预,在功能实现上,将剖面地质界线的倾向及其交错、接续关系的参数放开并可作为剖面线属性填充到建模数据中。该属性可按照地层在剖面上的大致走向分为垂直向和水平向,而垂直向又可分为回旋向和断块向。由此,在实际建模过程中,建模人员可根据地质专业认识判断地层发展形态,并为剖面地质界线添加相应的分类属性,以控制地层线的使用顺序并选择地层面构建算法,在一定程度上实现人工干预的建模过程。

1.2 构建断层分段面

断层在地质模型中常用地层分界面进行表达,是影响其他地层面生成的重要约束数据。因此,对于有断层体现的建模区域,会在构建地层面时将断层面先构建出来。实际建模时,通过剖面断层线提供的倾向、倾角、埋深和影响地层以及平面断层反映的断层平面长度、走向和相互关系等,可以自动构建出三维断层面。同时,在这些断层面中,筛选出将建模区域整体截断的断层面作为区域分段面,使建模区域沿断层构造走向细分块段,降低单个建模块段内的地层构造复杂度,为之后的地层面构建奠定基础。同理,使用数据分段工具,建模人员可以在

数据中任意指定位置生成分段线,切分没有自然分段线的复杂数据,优化建模操作。图3为基于断层面和剖面对建模区域分段的示意图,图中5条剖面线和一个断层面将建模区域分成8个块段。

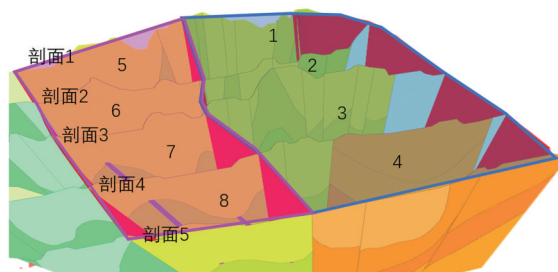


图3 基于断层面和剖面对建模区域分段的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of modeling area segmentation based on fault plane and profile

1.3 构建框架(一级)地层模型

断层分段面构建完成后,即可进行地层面的构建。首先判断剖面上总体的地层倾向分布趋势,按照水平走向和垂直走向的划分,从剖面 and 地质图上提取框架地层分界线,按照地层线形态、剖面间地层对应情况、地质图上地层界线形态,参照剖面线属性,选择插值或产状推断等对应的构面算法构建框架地层分界面,并通过求交迭代和曲面外推方式处理面拓扑一致性,最后按照三维空间关系分组合并,封闭成体,保证地质体的空间拓扑正确。

1.4 构建精细(二级)地层模型

在构建的框架(一级)地层基础上,分别在水平方向和垂直方向框架地层内进行精细地层构建。在水平向地层内,按照地层叠覆关系和地层顺序,逐层提取地层线插值构建;在竖直向地层内,按照地层与剖面、地质图的邻接关系确定构建顺序,补全区段内地层线,并根据补全的地层线形态选择相应的算法进行地层曲面构建,通过不断迭代判断修正,消除曲面自相交等拓扑错误后,封闭生成地质体,并根据剖面、地质图与地质体的空间关系赋予相应的地层属性,最终得到完整地质体模型。

2 建模难点

2.1 地层间拓扑问题处理

传统的地层显式建模方法是按照地层顺序从

上至下或从下至上,受限於插值方法,此种建模方式要求地层满足水平方向分布,构建出层层叠加的模型效果。而隐式建模会将整个建模空间细分,通过离散网格追踪出地层面或地层属性在空间中的分布,再转变成地层结构模型,但这种方法难以在剖面 and 地质图部分实现强约束(Guo J T et al., 2021)。

复杂地质图建模中,由于同时存在水平向和垂直向分布的地层,为保证地层拓扑关系上尽可能正确,在算法上首先判断地层总体的倾向分布趋势,按照水平向和垂直向的划分构建一级地层,保证一级地层整体的拓扑正确后,在一级地层内按照相同的分类进行持续迭代细分,直至建模完成。

在水平向地层内部构建时,按照层状地质体叠覆关系从上至下逐层构建。在竖直向地层内部构建时,参照标准地层顺序,优先构建剖面 and 地质图同时约束的块体,然后构建只有地质图约束的块体,最后构建只有剖面约束的块体。在构建竖直向地层间的接触面时,为解决不同地层参与建模的数据不同而导致的产状计算偏差,需要在构建地层时向外延展一段距离,并在构建层面时与已构建的地层面持续进行相交判断,确保接触面间没有空隙,同时

不穿过其他未构建的地层范围。以此保证建模结果能充满整个建模空间,不出现重叠、漏洞、自相交等错误。

2.2 不连续、不对应地层线自动补全

在区域分段内进行建模时,会将地层整体作为一个对象进行处理,由于地层沉积或地质运动影响,在一个建模单元内,同一个地层分布并不连续、相邻剖面上相同地层线长短不一、产状不同甚至相反,为保证建模结果的地质规律正确,需要将断开的地层线延长或补充完整。首先按照地层接续关系将地层线直接相连,再与建模地层剖面逐个进行相交判断,如果相交则需要将连接线段进行拉伸,保证线段不穿过未建地层(包括当前地层本身)的空间范围。图4为剖面不连续地层补全示意图,该处地层建模顺序为A-B-C,因为A地层已构建,则图中红色加粗地层线已被使用,不能作为地层B的边界线,按照模型拓扑要求和建模顺序,则B的地层线为蓝色细线,补充时,先将两条线直线相连,则会穿过还未构建的地层C,则需要将地层线向上拉伸,确保不穿过未建的B和C地层,最终得到的连续曲线就是该剖面上B地层的建模边界线。

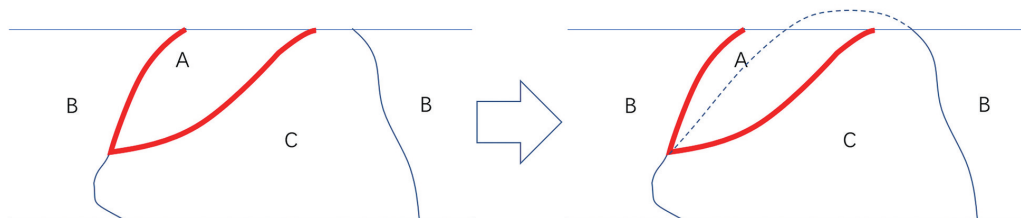


图4 剖面不连续地层补全示意图

Fig. 4 Schematic diagram of section discontinuous formation completion

2.3 不规则曲面构建

本文建模方法以三维地质剖面 and 地质图作为主要建模数据,仅通过地层曲面的外轮廓进行曲面构建,且在剖面对应情况较差的区域轮廓边界并不完整,因此,现有的显式插值方法都不太适用,容易出现不合理的尖灭或形态突变,特别是对于波浪形曲线表示的不整合、造成垂向多解的侵入岩、平卧

褶皱和火山通道等,通过外轮廓插值难以实现这些曲面的形态表达。

为此,本文建模算法借鉴了 morphing 变形算法(肖巍峰等,2015;许珂和徐亚杏,2018;潘卓等,2020),采用自动化交互建模的思路,模拟地质人员进行交互建模时对这些不规则曲面的处理方法,采用地层线自动补全算法将地层线补充完整

后,对地质图边界和剖面地层线进行细分,将所有线段离散成等距的点,然后根据地质图上地质界线的形态和剖面地层线的倾向自动推断各个位置的产状,根据产状连接依序构建分段面,并与已有分段面和地层面进行相交判断,若相交则在局部进行进一步细分,调整曲面形态和产状,规避分段间的自相交现象,将所有分段面合并后即可得到完整的地层曲面。图5为不规则曲面构建示意图,图中为两条剖面 and 对应地质图的地层界线,将三段地层线细分后根据剖面线段的产状和地质图地层界线的弯曲形态计算第一段面的产状,进而推断地质图界线上点在第一段的位置,连接构成第一段曲面,而后以此类推逐段构建,直至地层面构建完成。

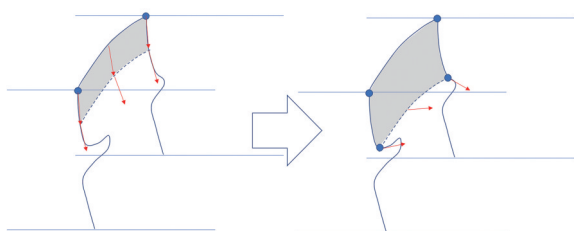


图5 不规则曲面构建示意图

Fig. 5 Schematic diagram of irregular surface construction

此外,对于仅在单条剖面存在的竖直向地层轮廓线,算法会根据地质图上地质边界形态和剖面地层线产状构建回旋式的产状曲面,并通过机器学习内插的方式确定地层面的下沿范围,避免生成的地质体与相邻剖面相交,如图6。

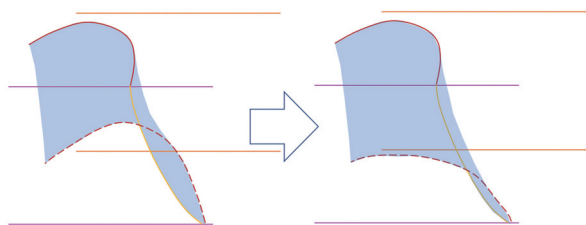


图6 回旋式曲面构建示意图

Fig. 6 Schematic diagram of convoluted surface construction

3 应用实践

应用本文建模方法,以三维平行地质剖面为基

础数据,结合地表地形数据(DEM)、平面断层、平面地质图等数据,快速、自动构建了广东省1:25万基岩三维模型,模型深度2.5 km,最小地质单元到组。采用的建模软件是以MapGIS10三维地学建模模块为基础,自主研发的工具软件。为了降低大面积三维地质建模的难度以及提高建模效率,采用平行剖面分割建模区域的方法,将广东省全省陆域范围分割成条带状区域,然后以每个条带状区域为初始建模单元进行三维地质建模,最后进行模型的无缝拼接,得到整个区域的三维地质模型。平行剖面绘制采用图切剖面法,平面地质图为更新的广东省1:25万地质图。

第四系层状模型采用基于地质分区图的地质体快速建模,建模数据为钻孔数据和地质图数据。第四系模型和基岩模型采用基岩面进行约束控制。本文只介绍基岩三维模型的构建。

3.1 广东省地质背景

广东省地层发育,自中—新元古界至第四系均有出露,地层出露面积占陆地总面积的65%,沉积建造类型复杂,赋存各类沉积矿产。

广东省地处东南沿海大陆边缘,为环太平洋中新生代巨型构造—岩浆带之陆缘活动带的一部分,地质构造复杂多样。在漫长的地质发展历史中,经历了多次强烈的地壳运动和断裂构造运动。各主要构造期均伴有规模不等的岩浆侵入活动,形成了遍布全省的不同类型、大小不一的侵入体,分布面积达60000 km²,尤以粤中及粤东沿海最为集中,组成巨大的东西向及北东向复式岩带。在规模上,以燕山期最为宏大,出露面积最广,几乎遍及全省,次为晋宁期及加里东期,喜山期活动规模最小,零星分布。

广东省火山岩发育,自中元古代至第四纪均有火山活动,共有51个含火山岩的地层。火山活动具有多期性和多旋回性,根据火山地层建造、火山作用等特征,结合地壳运动用构造旋回可划分为晋宁、加里东、华力西—印支、燕山及喜马拉雅等5个构造岩浆旋回。

全省在地质历史时期经历过多次剧烈的地壳运动,形成了一系列规模不一、性质不同的断裂,尤其是规模大、切割深及反复活动的深、大断裂,不仅控制了山川地势的展布、地层与岩石的分布、中—

新生代断陷盆地的形成与发展,而且控制着地下水的分布与出露。据查明,全省断裂构造骨架主要由区域性主干断裂带和区域性断裂带构成(图7)。

区域性主干断裂带一般是构造单元或造山带的边界。这种断裂带规模大,长达百千米以上,宽数千千米至数十千米;断裂切割深,一般切穿硅铝层或硅镁层,局部切入上地幔;具有多旋回、继承性和长期活动特征,对盆地沉积、岩浆活动、变质作用及成矿作用等均有明显控制作用。这类断裂带有3条:吴川—四会断裂带、河源断裂带、莲花山断裂带(庄文明等,2017)。

区域性断裂带具以下特征:规模较大,延伸可达数百公里,宽几至几十公里;切割较深,至少切穿

结晶基底;对沉积、岩浆、成矿等有明显控制作用,具长期活动特征,常为广东省次级构造单元边界。这一级别的断裂带主要有北北东—北东向、北西向及近东西向三组,另外还有一组弧形断裂带。

3.2 平行剖面线布置

广东省地质构造走向以北东向为主,北西向为辅,广东全省平行剖面线布置采用垂直于主构造走向的方向,即北西向。同时结合模型精度(1:25万)要求,以4 km (1:25万区域地质调查路线布置密度)为间距布置,以尽可能反映地貌及地质构造走向的垂向截面形态,并减少剖面间一致性处理的难度和工作量。通过咨询地质专家意见,首先确定第一条主干剖面位置,然后依次以4 km为间距布置

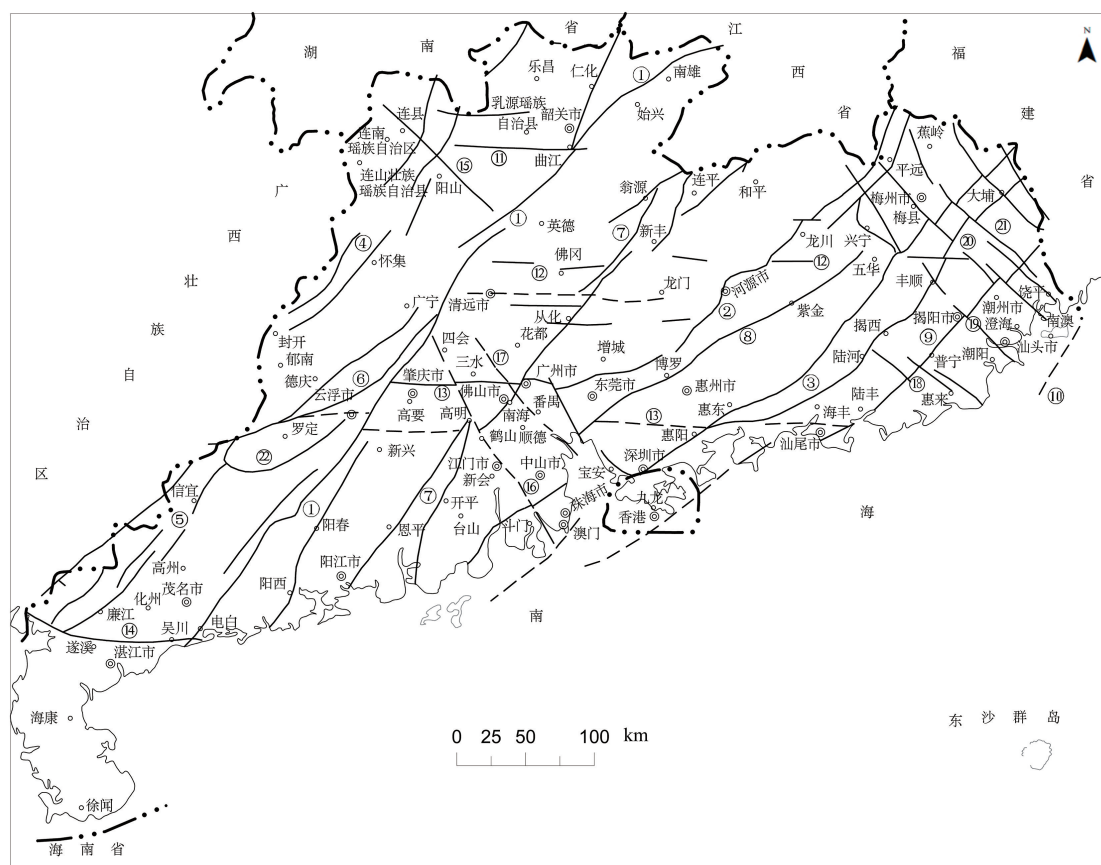


图7 广东省及香港、澳门特别行政区断裂构造分布图

Fig. 7 Fault structures distribution map of Guangdong Province, Hong Kong and Macao Special Administrative Regions

- ①吴川—四会断裂带;②河源断裂带;③莲花山断裂带;④郴州—怀集断裂带;⑤信宜—廉江大断裂带;⑥罗定—广宁断裂带;
⑦恩平—新丰断裂带;⑧紫金—博罗断裂带;⑨潮州—汕尾断裂带;⑩南澳断裂;⑪贵东断裂带;⑫佛岗—丰良断裂带;
⑬高要—惠来断裂带;⑭遂溪断裂带;⑮连州—阳山断裂带;⑯西江断裂;⑰沙湾断裂带;⑱河婆—惠来断裂带;
⑲榕江断裂带;⑳梅州—潮州断裂带;㉑饶平—大埔断裂带;㉒贵子弧形断裂

据庄文明等(2017)修改

北西向剖面,剖面总计240条。

对于北西向及东西向断层,本文建模方法也能很好地兼容。与北东向断层类似,北西向或东西向断层在建模时也可作为构建断层分段面的依据,将建模区域细分,降低单个建模块段内的地层构造复杂度。如图8,红色断层为近似北西向断层,三维模型构建时以该断层为分段面,将建模区域分为两块,然后再在区块内根据三维剖面形态构建三维模型。

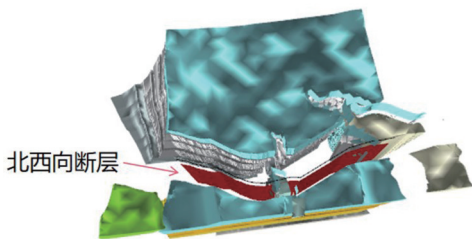


图8 北西向断层在三维模型中的表达
Fig. 8 Expression of NW-trending fault in 3D geological model

3.3 三维模型构建

3.3.1 主要建模数据来源

本次建模主要数据源包括广东省1:25万地质

图、240条平行剖面、广东省1:25万DEM数据、平面断层分布图(从基础地质图提取)。图9展示了主要建模数据。

1、广东省1:25万地质图

已有数据中,没有编制好的广东省1:25万地质图,且考虑到近二十年来广东省在编图和区域地质调查成果上取得的新进展,因此,部署了广东省1:25万地质图更新编制。

在系统收集和综合分析已有资料的基础上,以《广东省重要矿产资源潜力评价》(杨大欢等,2013)、《广东省及香港、澳门特别行政区区域地质志》(简称“新版《广东省地质志》”)(庄文明等,2017)成果为基础,利用2010年以来完成的55幅1:5万区域地质调查成果,分幅更新全省1:25万基础地质图,并完成接边和拼接,得到全省1:25万地质图。

2、平行剖面

平行剖面绘制采用图切剖面方法,以更新后的广东省1:25万基础地质图为底图,按照剖面布置线,以横、纵向比例尺1:250000进行绘制,绘制深度为黄海高程0米标高以下2.5 km。图切剖面只完成不同地质界线、地质体标识和属性填充,不进行花纹填充。不表达岩脉(特殊意义的岩脉除外)和第四系。每

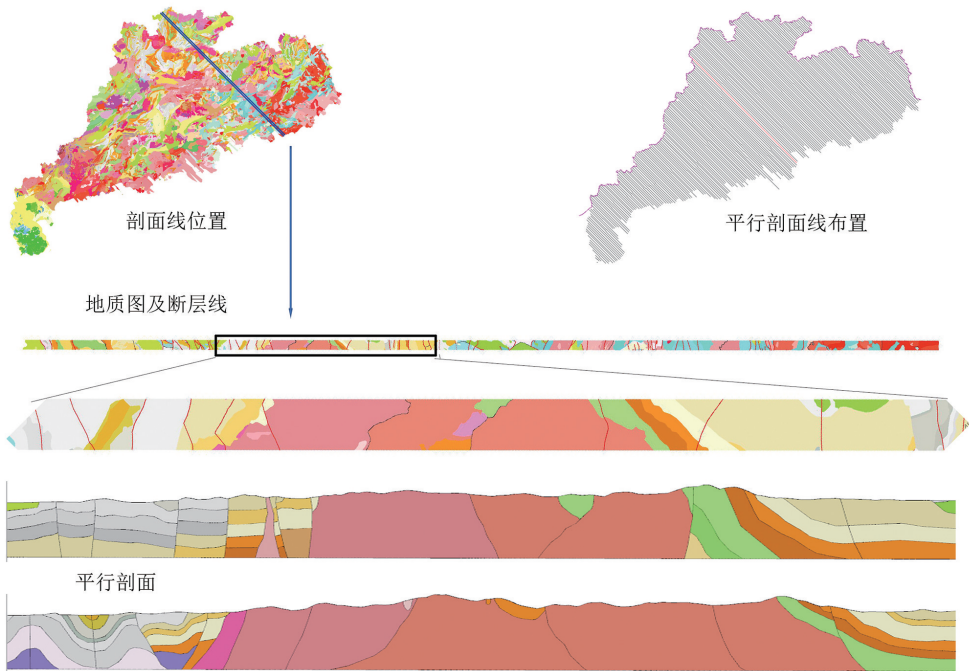


图9 平行剖面线布置、地质图和断层线以及平行剖面图
Fig. 9 Layout of parallel profile lines, geological map, fault line and parallel profile

条剖面经内审后都经过地质专家评审并按照专家意见修改,以尽可能最大限度的与专家的认知一致。

3.3.2 全省三维地质模型(基岩部分)

由于全省面积大,三维地质模型数据量过大,整体展示受版面影响清晰度不够,因此采用分块方式(图10)进行展示,全省模型分四块进行展示。

3.3.3 典型区域三维地质模型

3.3.3.1 层状地层

图11为层状地层区域三维地质模型与三维平行剖面对比图。该处根据地层线或断层线进一步细分为3段进行建模,每段可以看作是层状地层,构建的三维模型和三维剖面完全吻合,地层接触关系正确,曲面平滑,没有空洞或三角面等,空间拓扑关系完全正确,本文建模方法对层状地层区域能够很好地表达。

3.3.3.2 侵入岩

图12为侵入岩构造区域三维地质模型与三维平行剖面对比图。该区位于粤东潮州地区,岩浆侵入活动强烈,形成了岩株、岩基等不同类型、大小不一的侵入体。构建的三维模型和剖面完全吻合,模型内部很好地表达了侵入岩和地层的接触关系、岩浆侵入的时间先后关系等,空间拓扑关系正确。

3.3.3.3 褶皱构造

图13为褶皱地质构造三维模型和三维剖面对比图。该区断裂活动强烈,形成明显的褶皱地质构造。构建三维地质模型时,以断裂线进一步将建模区域细分,然后再构建每个细分单元,最后进行模型的拼接。构建的三维地质模型与剖面完全对应,很好地表达了褶皱等造成水平地层单元破碎的地

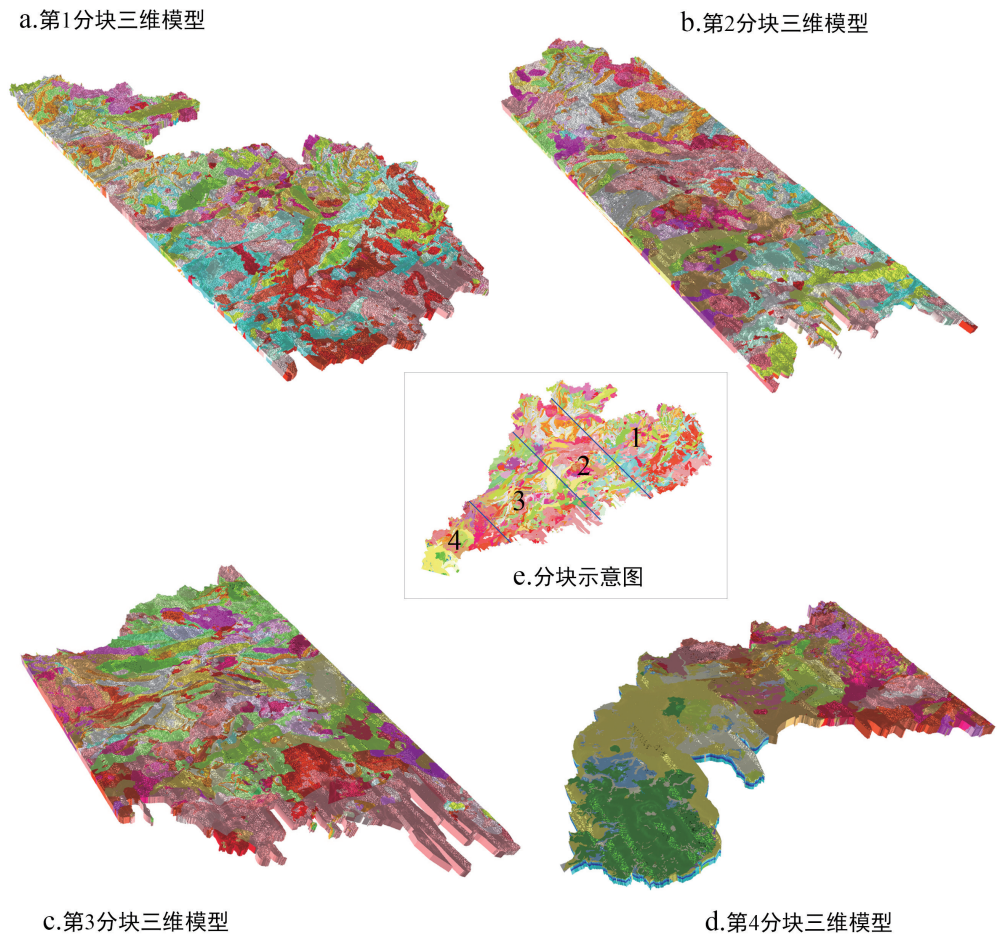


图10 广东省基岩三维模型效果图
Fig. 10 Rendering of bedrock 3D model of Guangdong Province

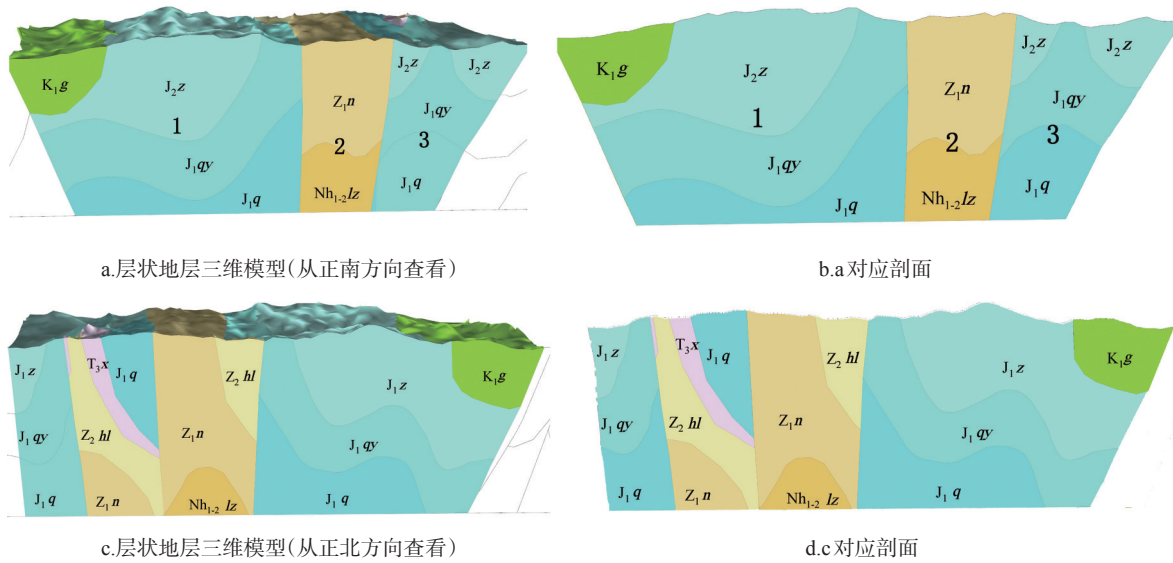


图 11 层状地层三维地质模型和剖面对比图

Fig. 11 Comparison diagram of 3D geological model and profile of layered stratum

K_{1g}-官草湖组;J_{2z}-漳平组;J_{1qy}-桥源组;J_{1q}-青坑村组;T_{3x}-小坪组;Z_{2hl}-黄连组;Z_{1n}-南岩组;Nh_{1-2Lz}-楼子坝组

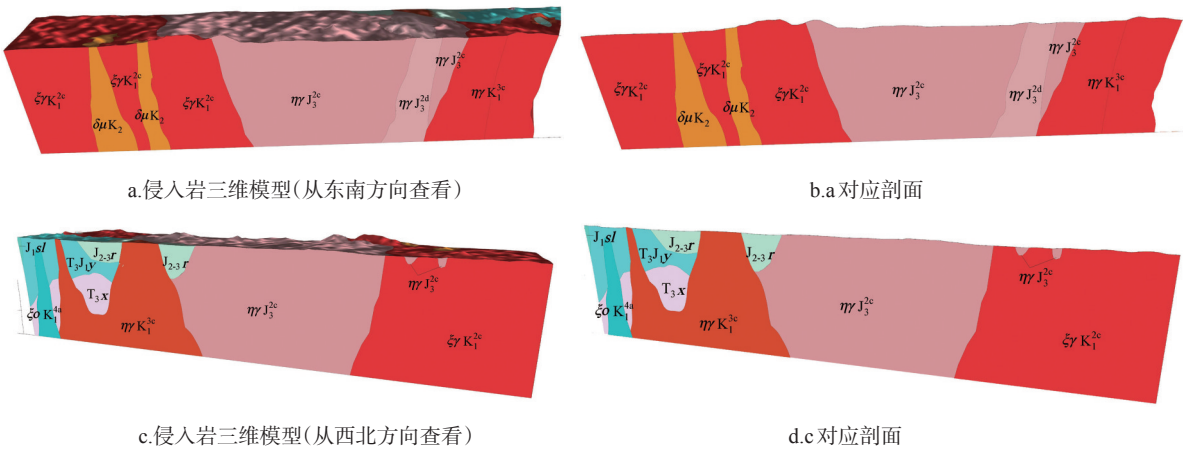


图 12 侵入岩三维地质模型和剖面对比图

Fig. 12 Comparison of 3D geological model and profile of intrusive rock

J_{2-3r}-热水洞组;J_{1sl}-上龙水组;T_{3Jy}-银瓶山组;T_{3x}-小坪组;δμK₂-闪长玢岩脉;ξγK₁^{2c}-正长花岗岩;ηγK₁^{3c}-二长花岗岩;
ξoK₁^{4a}-石英正长岩;ηγJ₃^{2c}-黑云母二长花岗岩;ηγJ₃^{2d}-黑云母二长花岗岩

质构造。

4 结语及展望

4.1 结语

(1)以三维地质剖面为基础的自动建模方法实现了地质剖面直接参与,地形、地质图、断层等数据

强约束下的显式三维地质自动建模过程。

(2)应用该建模方法,使用 240 条平行剖面分割建模区域,然后以每个条带状区域为初始建模单元进行三维地质建模,最后进行模型无缝拼接,首次完成了广东省全省陆域范围 1:25 万基岩三维建模。

(3)针对建模区域内多种复杂地质现象,在大

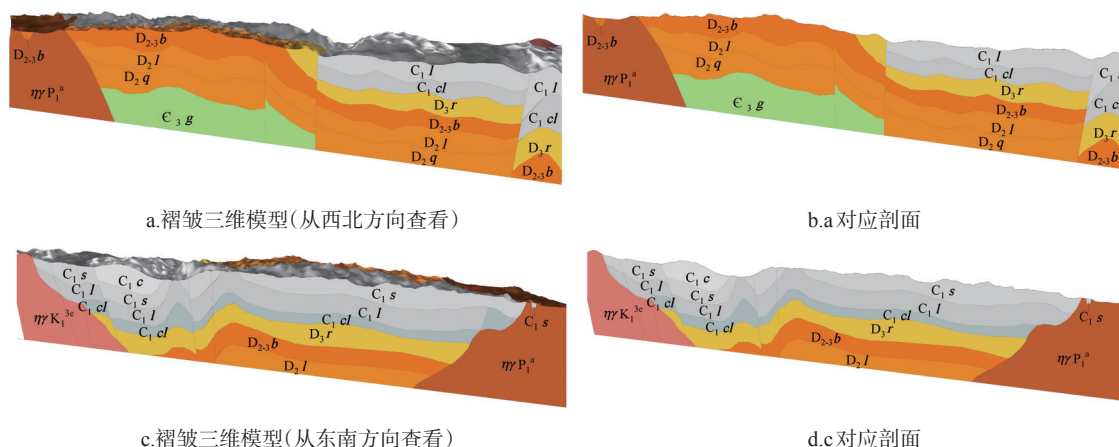


图 13 褶皱构造三维地质模型和剖面对比图

Fig. 13 Comparison of 3D geological model and profile of fold structure

C_{1c}-测水组; C_{1sd}-石磴子组; C_{1l}-连县组; C_{1cl}-长来组; D_{3r}-融县组; D_{23b}-巴漆组; D_{2q}-棋梓桥组; D_{2l}-老虎头组; C_{3g}-高滩组;
 ηγK₁³-黑云母二长花岗岩; ηγP₁^a-黑云母二长花岗岩

尺度上,通过地层总体形态走向分类分级处理,着力保证模型块体间的拓扑正确性;在小尺度精细建模中一定程度上实现了断层交错、褶皱、侵入岩、火山通道等形态变化快、产状突变、垂向多解、难以插值的地层面的自动构建。

(4)对局部不符合总体规律的特殊形态地质体进行针对性开发,解决仅有剖面约束的地层向下收敛插值、同区段同地层不相邻且总体产状相反等现象的自动构建;并结合数据处理要求开发了一系列数据生产、检查、编辑和辅助建模工具。

(5)该方法改善了复杂地质体建模只能通过人机交互实现的现状,提高了建模效率,可以为大范围复杂地质体快速建模提供借鉴。

4.2 展望

由于广东省地质条件复杂、建模面积大,该方法还存在一定局限性。在地层形态表达上,算法没有考虑不同地质地貌单元间的形态特征与差异并做适配和调整;算法也没能兼容所有复杂地质构造情况,特别是在多种地质构造组合影响下的地层形态,水平方向分布的纵向回旋状地层,以及剖面间地层及其形态完全不对应、产状倒转等。此外,在当前难以处理的地质构造处,容易出现地层面破碎、悬挂三角面等拓扑错误。针对这些问题,将进一步深入研究,提升算法的兼容性,提高模型精度。

参考文献:

- 程 春.2017.三维地质建模中复杂曲面造型技术研究[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 郭艳军,潘 懋,王 喆,王 颖,吴自兴,屈红刚,明 镜.2009.基于钻孔数据和交叉折剖面约束的三维地层建模方法研究[J].地理与地理信息科学,25(2):23-26.
- 韩 洒.2022.三维地质建模综述[J].世界有色金属,(2):155-157.
- 贾 梅,刘 星.2022.基于GOCAD的三维地质建模方法[J].山西焦煤科技,46(4):4-7.
- 雷传扬,刘兆鑫,文 辉,范 敏,蒋华标,王 波,马国玺,谢海洋,陶海江,郝金波.2022.基于多源数据和先验知识约束的复杂地质体三维建模研究[J].地质论评,68(4):1393-1411.
- 林冰仙,周良辰,闫国年.2013.虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建方法[J].地球信息科学学报,15(5):672-679.
- 刘顺昌,李 黎,徐德馨,曹厚臻.2021.复杂地质条件下高精度三维地质建模研究[J].人民长江,52(8):127-132.
- 马朝阳,王占昌,张立海,姚津涛,乔亚凯.2022.新型三维地质建模方法及其在成都—昌都区域建模的应用[J].西北地质,55(2):82-92.
- 潘 卓,邓 波,李嘉宝.2020.基于MapGis K10平台的张家界市中心城区三维地质模型建立[J].国土资源导刊,17(2):74-79.
- 冉祥金.2020.区域三维地质建模方法与建模系统研究[D].吉林大学博士学位论文.

- 王波,雷传扬,刘兆鑫,范敏,王兴强,叶凡忠,张堃.2021.三维地质建模过程中综合地质剖面构建方法研究[J].沉积与特提斯地质,41(1):112-120.
- 王丹.2012.基于平面地质图的三维地质建模方法研究[D].南京师范大学硕士学位论文.
- 王国光,魏志云,徐震,卓胜豪,陈诗.2022.岩土地层三维模型自动建模方法研究[J].地理空间信息,20(6):149-153.
- 王丽坤,简兴祥,罗海金,姚华龙.2022.基于图切剖面的降扎温泉三维地质建模研究及应用[J].四川地质学报,42(2):302-304+324.
- 王荣亮,郭军,陈龙.2022.基于剖面图的三维地质建模算法研究与技术应用[J].煤炭科技,43(3):109-113.
- 许国,王长海,周晓琴.2022.基于地质特征驱动的三维地质建模技术[J].深圳大学学报(理工版),39(4):417-423.
- 许珂,徐亚杏.2018.基于MapGIS-K9软件的城市三维地质建模方法探讨——以武汉市为例[J].华南地质与矿产,34(3):244-252.
- 肖巍峰,邓敏,李朝奎.2015.三维点云多尺度等值线模型Morphing变换方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),40(7):957-963.
- 杨大欢,刘建雄,严己宽.2013.广东省重要矿产资源潜力评价[R].广东省地质调查院.
- 曾敏,赵信文,陈松,王晓晗,皮鹏程,侯清芹,孙慧敏.2022.基于多源数据融合的广州南沙核心区三维工程地质建模[J].华南地质,38(2):281-291.
- 张源.2021.城市三维地质建模方法研究[J].矿山测量,49(1):65-68+88.
- 郑小杰,李晓晖,袁峰,薛晨,吴帮财.2022.姚家岭锌金多金属矿床三维地质建模与成矿预测[J].地质科学,57(3):910-923.
- 朱良峰,吴信才,刘修国,尚建嘎.2004.基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J].地理与地理信息科学,20(3):26-30.
- 朱宇辰,李茜.2022.云南普朗铜矿三维地质建模与深部找矿预测[J].地质学刊,46(2):190-198.
- 庄文明,刘建雄,黄继春,李出安.2017.广东省及香港、澳门特别行政区区域地质志[R].广东省地质调查院.
- Guo J T, Wang X L, Wang J M, Dai X W, Wu L X, Li C L, Li F D, Liu S J, Jessell M W. 2021. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical bore-hole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm[J]. Engineering Geology, 284: 106047.
- Tao Z G, Fan F Z, Yang X J, Guo Z Y, Li G Z, Meng X Z. 2021. Prediction of Deep Rock Mass Quality and Spatial Distribution Law of Open-pit Gold Mine Based on 3D Geological Modeling[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 39(4): 3221-3238.