

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.006

新型三维地质建模方法及其在成都-昌都 区域建模的应用

马朝阳¹, 王占昌², 张立海¹, 姚聿涛^{1,*}, 乔亚凯¹

(1. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:在地质研究不断深入和地理空间信息科学蓬勃发展的背景下, 三维可视化地质建模技术已成为信息科学与地球科学交叉领域的研究热点。笔者对传统的三维地质建模方法进行研究、改进, 形成一种新型的三维地质建模新方法。新型三维地质建模方法主要应用于地质领域, 在多源异构地质数据融合、大规模高精度建模、地质网格细分、属性建模技术和遥感图像融合等方面取得了新的进展。笔者以成都-昌都区域为例, 以地质钻孔数据、成都图幅、昌都图幅、遥感数据为数据源, 利用新一代三维地质建模技术, 进行了三维地质建模和可视化显示。成都-昌都区域的三维可视化验证了新型三维地质建模方法的可行性和有效性。同时也为全国重要地质钻孔数据服务平台对社会公开发布覆盖全国 31 个省(区、市), 累计进尺达 2.75 亿 m 的 110 万个重要钻孔数据三维地质建模提供了重要方法。

关键词:多源异构; 钻孔数据; 大规模高精度建模; 网格划分; 空间插值

中图分类号: P628

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)02-0082-11

A New 3D Geological Modeling Method and Its Application in Chengdu-Changdu Region Modeling

MA Zhaoyang¹, WANG Zhanchang², ZHANG Lihai¹, YAO Yutao^{1,*}, QIAO Yakai¹

(1. Physical Geological Information Centre for Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Under the background of the deepening of geological research and the vigorous development of geospatial information science 3D visualization geological modeling technology has become a research hotspot in the interdisciplinary fields of information science and earth science. In this study, the traditional 3D geological modeling method is studied and improved to form a new 3D geological modeling method. The new 3D geological modeling method is mainly applied in the geological field, and new progress has been made in multi-source heterogeneous geological data fusion, large-scale high-precision modeling, geological grid subdivision, attribute modeling technology, remote sensing image fusion and other aspects. Taking the Chengdu-Changdu region as an example, this paper uses the new generation of 3D geological modeling technology to carry out 3D geological modeling and visualization with geological

收稿日期: 2021-08-07; 修回日期: 2021-11-22; 网络发表日期: 2022-05-10; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“全国地质钻孔数据更新与服务”资助(DD20190410)。

作者简介: 马朝阳(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事实物地质资料综合研究。E-mail: 1066061564@qq.com。

* 通讯作者: 姚聿涛(1986-), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事实物地质资料信息化建设工作。E-mail: yyuao@mail.cgs.gov.cn。

borehole data, Chengdu map, Changdu map and remote sensing data as data sources. The 3D visualization of Chengdu-Changdu region verifies the feasibility and effectiveness of the new 3D geological modeling method. At the same time, it also provides an important method for the national important geological borehole data service platform to publicly release 1.1 million important borehole data 3D geological modeling covering 31 provinces (autonomous regions and municipalities) in China with a cumulative depth of 275 million meters.

Keywords: multi-source heterogeneous; borehole data; large-scale high-precision modeling; grid segmentation; spatial interpolation

地质体的物质组成、结构构造直至动态演化极为复杂,常规数学方法不能准确描述其特征,同时还受制于地质数据在空间上的可利用性(李林, 2000)。海量地质信息如果仅仅局限于二维图表或剖面,就无法使研究人员大脑中形成一个整体的地质结构。只有建立三维可视化地质结构模型,才能够直观地表现地形、地貌、地质构造等空间分布状态,以及他们之间的相互关系(李良平等, 2007)。在地质信息应用方面,三维地质模型具有很强的表现能力(王亚军等, 2014)。三维地质模型是地质信息的重要载体与研究对象,需基于多方面调查数据并结合地质认识联合构建(杨波等, 2021)。因此,越来越多的学者开始了地质三维建模可视化工作。以三维形式还原地质构造和储层属性,实现数字化地层的展示,从而得到更加深刻的地质认识(张伟等, 2013)。笔者研究对比了前人的建模方法。例如,三棱柱体剖分方法、三维地质表面重构方法、岩柱体分区法和矢量-栅格一体化的三维模型构建方法,以及基于这些方法所开发的国内外成熟的三维地质建模软件。例如,国外的 Mining Visualization System 系列软件、Datamine 矿业软件和 Vulcan 软件,国内的 3D Mine、MapGIS 和 QuantyView。本次研究在前人的基础上,综合运用了多源异构地质数据融合、大规模高精度建模、地质网格细分、属性建模和遥感图像融合等技术,研发了新型三维地质建模方法。为了验证此方法的实用性,选取了四川盆地边缘进行三维地质建模,建模工区范围达 $31\,104\text{ km}^2$; 数据源为 1:100 万的地质图幅,1 500 个地质钻孔数据;以及遥感数据;建模软件为深探地学软件。此次三维地质建模成功再现了建模工区的地形、地貌和地质构造,验证了该方法的可行性与实用性。

1 研究背景

三维地质建模技术研究是当前地下工程三维可视化研究的热点之一(李芳玉, 2011)。近年来,众多学者做了大量的三维地质建模研究及实验,提出或改进了很多三维地质体数据模型。针对现有矿山储量计算方法计算结果精度低及边界条件适应能力差的问题,改进了三棱柱体剖分方法(朱德福, 2015)。在传统栅格法的基础上,提出一种顾及几何特征和约束的栅格生成方法,保持地质体的空间几何形态特征,保证加密区域与非加密区域的平滑过渡(李想, 2013);提出了一种新的轮廓线三维地质表面重构方法,可以进一步提高曲面的几何质量(杨洋等, 2015);提出了构建含有断层的复杂地质体的虚拟广义三棱柱模型,克服了以往只能将跨越不同质地层的 GTP 当一种地层处理的问题(李昌领等, 2013);提出了岩柱体分区法,该方法基于 GTP 能够对一些复杂地质体构建建模(车德福等, 2008)。基于面向对象的思想,实现了矿体矢量-栅格一体化的三维模型构建;解决了地下矿体解译与圈定问题(刘亚静等, 2012)。以半巷道体为基本体元,利用所有可能的多种体元构建完整的地下巷道网络(张志华等, 2011),同时提出了一种基于剖面图的巷道与地层体交切模型(张志华等, 2014),为相关的三维地质建模提供了借鉴。基于多层 DEM 表面数据模型,对钻孔数据中的岩层分界点进行排序来建立三维模型(贺怀建等, 2002)。运用 Delaunay 三角剖分的方法和钻孔数据建立不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)来实现三维建模(朱合华等, 2003)。根据叠层 TIN 模型以及离散点和特征面,由 Delaunay 方法构建三维地层模型(张煜等, 2001;白世伟等, 2002;Lemon A M, 等 2003;朱良峰等,

2006;徐磊等,2007;向林中等,2010)。基于上述方法,国内外推出了一些三维地质建模产品。国外针对三维地质建模与可视化研究和相关软件研制较早,目前比较成熟的软件系统有:美国 CTECH 公司的 Mining Visualization System 系列软件、英国的 Datamine 矿业软件、澳大利亚 MAPTEK 公司的 Vulcan 软件、加拿大 Gemcom 公司的 Surpac 矿业软件,其他还有如美国 Mintec 公司的 MineSight、澳大利亚的 Micromine 等软件。国内近年来也研发出多款优质的三维地质建模软件。例如,北京三地曼矿业软件科技有限公司开发的一套 3D Mine 矿业工程软件,中地数码集团的一款具有完全自主知识产权的地理信息平台 MapGIS,武汉地大坤迪科技有限公司开发的 QuanyView 软件平台。

上述方法建模自动化程度较低,建模过程比较复杂,限制了三维模型在工程中的应用。此外,基于这些方法研发的三维地质可视化软件大多是单机版,客户访问权限、范围受到了约束,而且价格昂贵,应用复杂繁琐,硬件环境要求较高,其扩展和跨平台能力较差,具有较强的针对性或较窄的适用范围。针对这一情况,笔者在传统三维地质建模的基础上,采用多源异构地质数据融合、大规模高精度建模、地质网格细分、属性建模技术和遥感图像融合等技术研发了地学深探软件,实现地质体信息三维可视化,既具有传统软件的可视化能力,又能实现网络环境下的数据共享、多人协同建模、大规模整体高精度建模等。

2 新型三维建模方法关键技术

2.1 概述

本文提到的新型三维建模方法是指在传统的三维地质建模技术基础上,结合多源异构数据处理技术、整体模型数据库技术、局部建模无缝拼接技术和遥感技术方法后发展出来的新的系统性三维地质建模方法。基于此方法的理念,研发出地学深探软件部分功能,并应用于此次建模。

2.2 多源异构数据处理技术

2.2.1 地质数据特点

三维建模数据具有多源异构的特性,即同一地区会有多元数据描述该地区的地质现象。例如:遥感数据、钻孔数据、剖面数据、物探数据等。每一类数据可能有多个源头,即由多个单位提供。虽然该地区的地质现象是特定的,然而这些多源异构地质数据的一致性与正确性是难以保障的,从而导致地质大数据质量的不确定性。

2.2.2 异构数据同构化

多源异构数据处理技术是利用各种来源的数据融合进行地质建模,无论是物探数据、钻孔数据、平面地质图、剖面图,还是地形地貌、遥感资料等数据,首要问题都是将异构数据转换成同构的矢量数据(点、线),然后为生成地层面、断层面和岩体表面等曲面提供基础数据源(表 1)。

表 1 多源异构数据同构化处理表
Tab. 1 Isomerization of multi-source heterogeneous data

数据类型	地质体	数据来源	预处理成果
点	地层	钻孔、DEM、TIN 网格、物探解释离散点	钻孔地层分层点集合
	断层	钻孔、TIN 网格	钻孔断点集合
	侵入体	钻孔、TIN 网格	岩体界面点集
	属性	遥感图像、监测点、点云	属性点
线	地层	剖面图地层线	地层线集合
		平面地质图地层分界线	地层线集合
		物探解释线	地层线集合
	断层	剖面图断层线	断层线集合
		地表地质图断层线	断层线集合
		物探解释断棱	断层线集合
	侵入体	剖面图侵入体边界线	侵入体边界线集合
		地表地质图侵入体边界线	侵入体边界线集合
		物探解释边界	侵入体边界线集合
	属性	等值线、地质图区域边界、沉积相区域、测井曲线	属性线段

2.2.3 数据冲突优先级

多源异构数据处理技术解决的另一个核心问题是当各类数据出现矛盾时,冲突数据在建模过程中的优先使用级别问题。本方法处理过程采用精度优先原则,即源数据的使用优先级和勘探精度正相关,精度越高优先级越高。

2.3 大规模整体高精度建模技术

2.3.1 工作原理

大规模整体建模是指针对大范围地质研究区域建立满足精度要求,同时覆盖整个研究区域的连续三维地质体模型。该技术主要采用模型数据库和数据扩展技术。在模型数据库技术支持下,实现大区域不同地层的整体建模,同时局部模型精度达到常规小区块模型精度。基于数据外拓技术,实现边界断层及地层的拼接融合,提高边界断

层认识精度。一方面,大规模高精度整体建模能够对复杂结构进行处理,保证模型信息的一致性,实现多个工作区域的高精度融合,解决现有建模成果的有效继承问题;另一方面,大规模高精度整体建模能够进行数据和模型的统一存储,构建统一的管理和通信平台,从而实现信息实时共享。大规模整体建模技术所面向的是勘探和开发进行较为深入的成熟地质研究或矿产生产区域,该区域范围较大,并且所使用的地质资料也具有多种类型,多种置信度和数据量庞大等特征,构建的大规模整体模型能够对范围内的所有地质构造形态进行准确描述。同时,整体构造模型是进行精细地质管理的基础模型,具有较高的精细描述能力、快速的数据计算能力和实时的动态更新能力。大尺寸高精度整体建模工作原理见图 1。

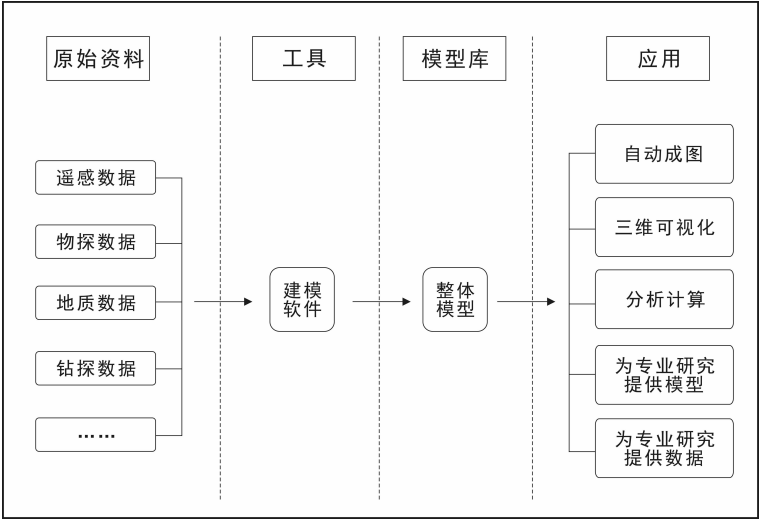


图 1 大规模整体建模工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of large-scale overall modeling

整体建模工作思路:首先将原始资料存贮在建模软件的数据库中;再利用建模软件的模型数据库技术、局部建模无缝拼接技术、多人并行工作模式建立整体模型;最后运用集群可视化技术查看整体模型,开展基于模型的各种应用。

2.3.2 整体模型数据库技术

整体模型数据库技术打破了传统独立模型文件存储的模式,采用片元化的存储模式,表格以字段形式存储成果模型,这是模型数据库的核心技术。整体模型可以由用户指定划分单元格,划分结果保存到数据库文件中,每个单元格对应存储在数据库的一个表

格中,表格以字段的形式记录信息。当下载局部模型时,会判断锁定的单元格,因此建立好的局部模型,导出成果也是通过处理使之变成多个片元模型来导出的,记录到数据库中的是将每个片元模型的信息以字段形式记录到对应的单元格表中来实现存储。调用的过程和存储类似;在数据库中提取锁定的单元格模型后需要某种处理,使其组合成一个完整的模型,然后加载到建模软件中,实现成果模型的展示。

2.3.3 局部建模无缝拼接技术

对于拼接的小区块、小工区,传统的建模软件基本都可以实现。但是如果拼接的区块过多、过大将

会导致涉及的工区范围很大,超出计算机、软件可以承受的限度,此时传统建模软件就无法实现。鉴于此种情况,笔者采用模型数据库技术,通过局部拼接、外拓网格,保障局部模型无缝拼接,实现多个工区的拼合,以及大工区之间的拼合。模型数据库局部建模无缝拼接原理是:重叠区域数据全部加载到数据库,实现构造认识统一;局部重叠区域重新更新模型。外拓网格保障更新后,模型和周围模型无缝拼接,实现多工区无缝拼接与融合。主要有 2 类拼接问题:①前期建模成果通过数据库实现成果的融

合(图 2)。②多人协同建立的局部模型在数据库中自动实现无缝融合(图 3)。

在局部模型的建模过程中也要注意拼接处的建模方法。对于相邻局部工区的拼接处的断层处理方法主要有以下 3 种情况:①拼接处涉及断层未作改动自动实现无缝拼接。②拼接处涉及断层改动,但对相邻区块没有影响,自动实现无缝拼接。③拼接处涉及断层改动,并对相邻区块造成影响,则需在该断层处下载另一区块重新建模,以此实现无缝拼接。对于拼接区地层模型的建立需要保证拼接区断层模

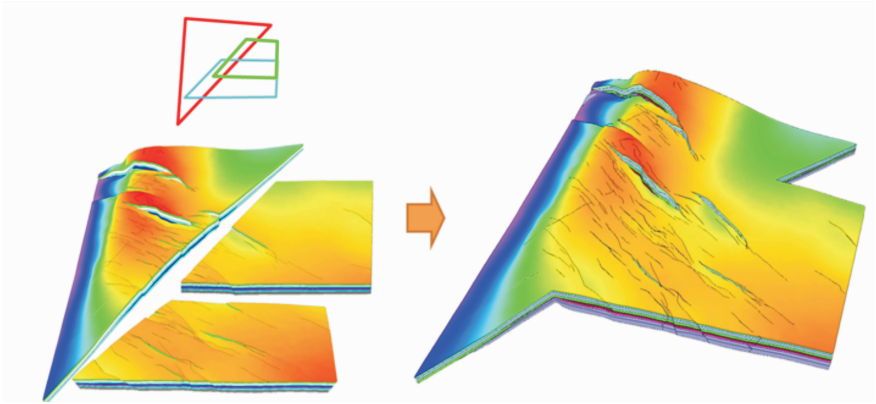


图 2 已有模型成果无缝融合图

Fig. 2 Seamless integration of existing model results

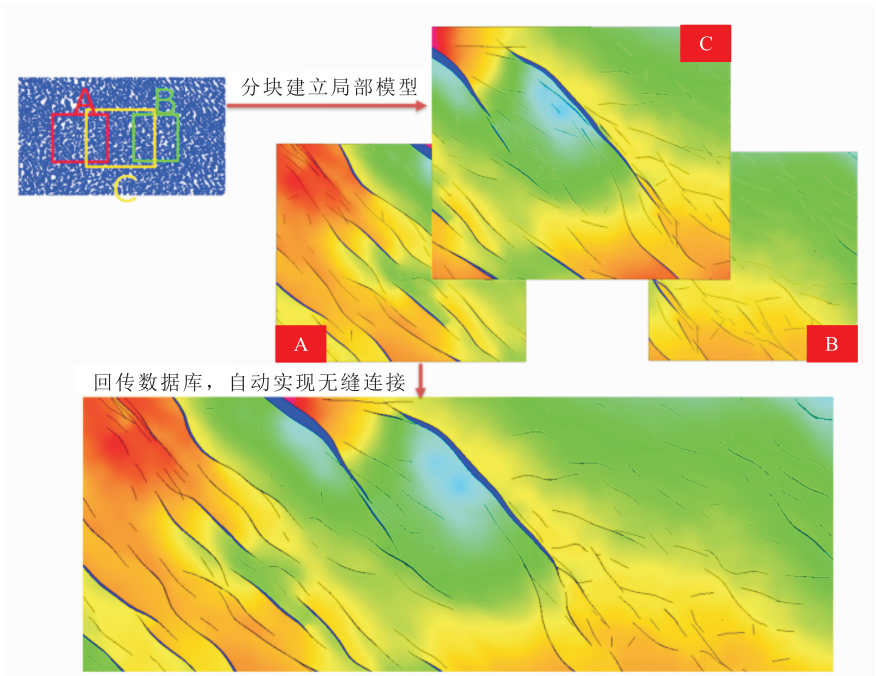


图 3 数据库无缝融合效果展示图

Fig. 3 Database seamless fusion effect display

型一致,且地层数据一致。

3 成都-昌都区域三维地质建模应用实例

3.1 需求概述

成都-昌都区域地处中国西南部,面积大,地质条件复杂。由于考虑在该区域实施重大建设项目,因此希望能够基于已有的地质资料,建立一个覆盖成都图幅和昌都图幅 2 个图幅拼接区域的建模工区,范围为 31 104 km² 的大规模且高精度的地质模型。该模型不仅需要能够提供对该地区基础构造的认识,而且在有高精度地质资料的地方要建立高精度的属性模型,并能够支撑对该地区工程建设提供地质适应性评价,能够支撑后续对地质环境保护、地

质灾害防控等工作。

3.2 建模方案概述

项目选择新型三维建模方法,综合运用地质学及相关学科理论,对成都-昌都区域地形、地貌、土岩界面、岩性界线、岩性组合、断裂、褶皱和构造面理等主要构造形迹,以及地下一定深度范围内地层分布、构造形态等特征进行调查与分析评价,详细掌握地表、地下地质体空间分布及其变化情况。采用研发的深探地学建模软件,多源融合钻孔、地质图、遥感影像数据,采用大规模整体建模技术建立大规模高精度多分辨率的整体地质模型;利用网格剖分和属性建模技术建立多属性模型,建立成都-昌都区域地质三维可视化模型,为地质研究、地质适宜性评价等工作提供三维地质数据服务。区域地质调查三维地质建模技术路线见图 4。

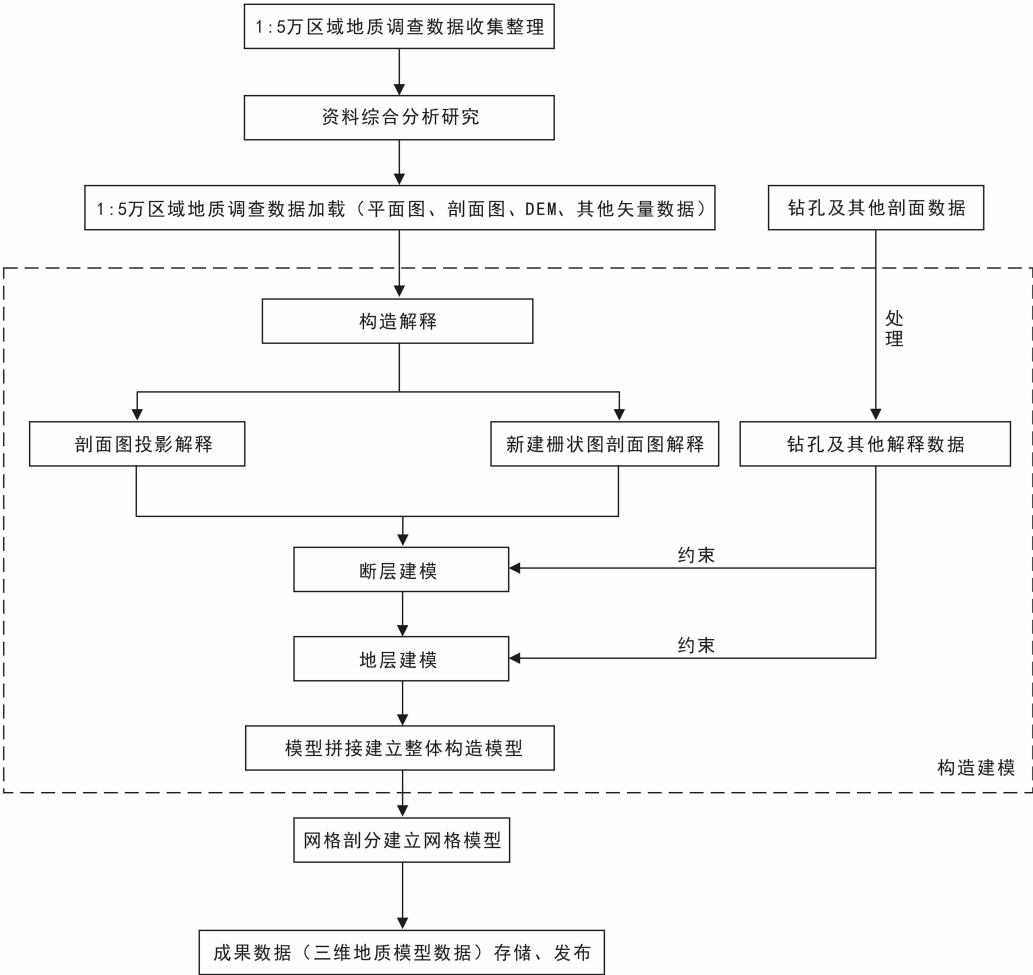


图 4 区域地质调查三维地质建模技术路线图

Fig. 4 Technical roadmap of 3D geological modeling for regional geological survey

3.3 数据源情况

3.3.1 钻孔分层数据

项目基于钻孔柱状图提供了该地区近 1 500 个钻孔的基础地质年代、地层组等分层资料。钻孔深度为 20~650 m,钻孔分层部分数据见表 2。

3.3.2 地质图资料

本次研究采用了 1∶100 万成都图幅和昌都图

幅。建模工作是 2 个图幅的拼接区域。建模工区范围为 31 104 km²;该区域地势差异显著,构造非常复杂,属于四川盆地边缘,以深丘和山地为主,海拔大多为 1 000~3 000 m,相对高差约为 1 000 m。

3.3.3 遥感影像数据

本次建模采用了成都-昌都区域高精度遥感影像资料。用于前期建模参考及后期三维模型地表部

表 2 钻孔分层数据表
Tab. 2 Drilling stratification data

钻孔编号	层号	分层深度(m)		厚度(m)	组
		起	止		
13-2	1	0	1.6	1.6	九级滩组
13-2	2	1.6	132.76	131.16	玉龙山组
13-2	3	132.76	288.8	156.04	玉龙山组
13-2	4	288.8	299.97	11.17	长兴组
13-2	5	299.97	364.61	64.64	龙潭煤组
13-2	6	364.61	366.61	2	龙潭煤组
13-2	7	366.61	369.37	2.76	龙潭煤组
13-2	8	369.37	371.2	1.83	龙潭煤组
13-2	9	371.2	375.38	4.18	龙潭煤组
13-2	10	375.38	376.83	1.45	龙潭煤组
13-2	11	376.83	380.64	3.81	龙潭煤组
13-2	12	380.64	384.02	3.38	龙潭煤组
13-2	13	384.02	384.94	0.92	龙潭煤组
13-2	14	384.94	387.04	2.1	龙潭煤组
13-2	15	387.04	390.64	3.6	龙潭煤组
13-2	16	390.64	395.32	4.68	龙潭煤组
13-2	17	395.32	396.39	1.07	龙潭煤组
13-2	18	396.39	408.59	12.2	龙潭煤组
13-2	19	408.59	411.4	2.81	龙潭煤组
13-2	20	411.4	414.25	2.85	龙潭煤组
13-2	21	414.25	416.5	2.25	龙潭煤组
13-2	22	416.5	417.21	0.71	龙潭煤组
13-2	23	417.21	421.7	4.49	龙潭煤组

分融合一体可视化,协助该地区地质研究工作。遥感影像能客观地反映景物的形态、结构和空间关系等特征,使人们对地物有一个宏观整体的认识。通常认为,空间分辨率越高的数据越好(Sousa et al., 2015)。高分辨率光学遥感影像等高质量的土地覆盖数据产品是提取地表信息的重要数据源(Xiang, D et al., 2016)。同时,能够真实、客观地记录、反映地表场景,是三维地形仿真需要的重要数据资源。

3.3.4 数据整理

(1)钻孔数据整理:将钻孔数据整理成统一数据格式,其中分层点分别按“代”“系”和“纪”整理成 3 套分层数据,用于建立不同范围和精度的模型,解决工区过大而分层过薄的问题;将钻孔孔位数据由 WGS84 坐标系投影变换到中国 2 000 坐标系下,投影类型使用高斯-克吕格投影。

(2)图幅数据整理:将成都和昌都图幅投影到中国 2 000 坐标系下,确保和钻孔投影参数一致。

(3)地表高程数据整理:作地理空间数据云下载 90 m 分辨率数据,进行裁剪和抽稀处理;对栅格进行转点,然后再将数据投影到中国 2 000 坐标系下。

3.4 项目成果

3.4.1 基于多元数据的大规模高精度模型

应用新型三维地质建模方法,进行成都-昌都区域整体构造建模工作。利用钻孔数据、地质图数据及遥感数据进行三维地质建模工作。通过深探建模软件智能化生成三维地质模型;对模型经过网格剖

分、离散化存储及网络发布后,利用 OpenGL 三维渲染技术 Web 端浏览展示;叠加遥感影像、倾斜摄影模型或地表精细建筑模型形成地上、地下一体化模型展示,为其应用打下基础;建模精度达到网格精度 50 m、断层网格 50 m。按照整体建模技术路线分 4 块独立建模后,进行无缝拼接后,完成三维地质模型。

3.4.2 遥感影像融合可视化地质研究

由于地表景观的复杂和不规则,简单的纹理映射技术难以得到满意的结果。通过对遥感影像处理将其作为纹理图片贴于三维地形表面可大幅提高三维地形仿真的真实感(夏清等,2007)。遥感影像与 DEM 结合用作三维地形仿真的表面纹理贴图是提高仿真可视化真实感的有效技术。将数字高程模型数据与遥感图像叠合而生成三维影像不仅能够生动地反映该地区的地形、地貌特征,而且可真实再现该区的景观特征。这对于交通不便、人烟稀少的区域景观实现三维可视化具有很好的应用前景(夏清等, 2007)。通过深探软件融合后的遥感影像会和地质模型贴在一起(图 5),供地质研究,并具剖切、开挖等交互功能;支持判断三维模型的地质构造是否合理、沉积区域划分是否准确及岩土属性描述是否准确等等工作。

3.4.3 遥感影像解译断裂构造

通过遥感影像和三维大规模整体高精度模型的空间坐标转换后进行无缝融合,成果见图 6。

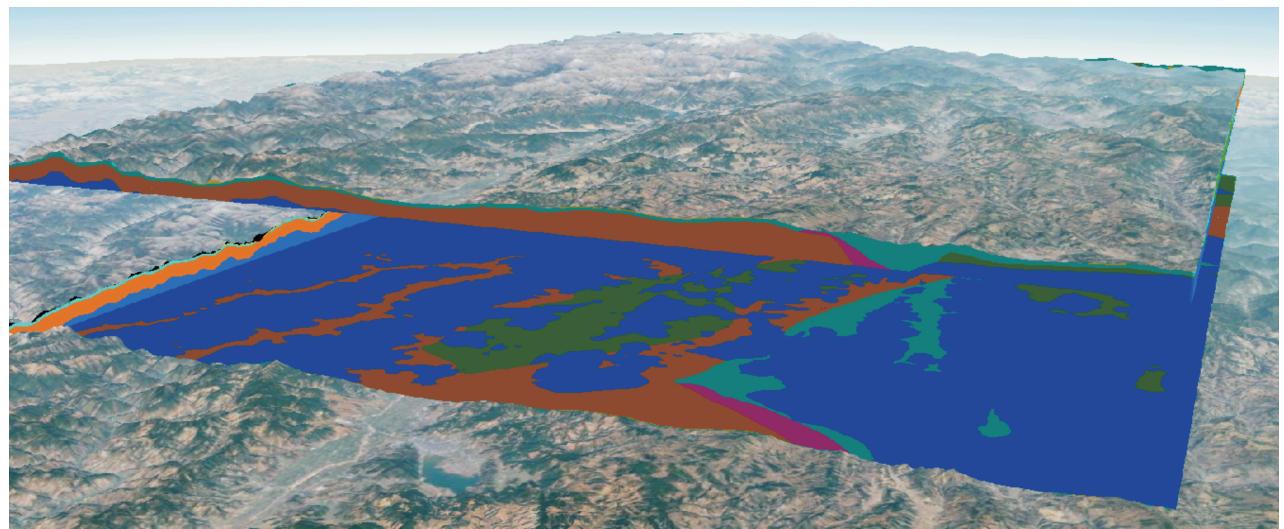


图 5 遥感影像融合交互研究图

Fig. 5 Interaction study of remote sensing image fusion

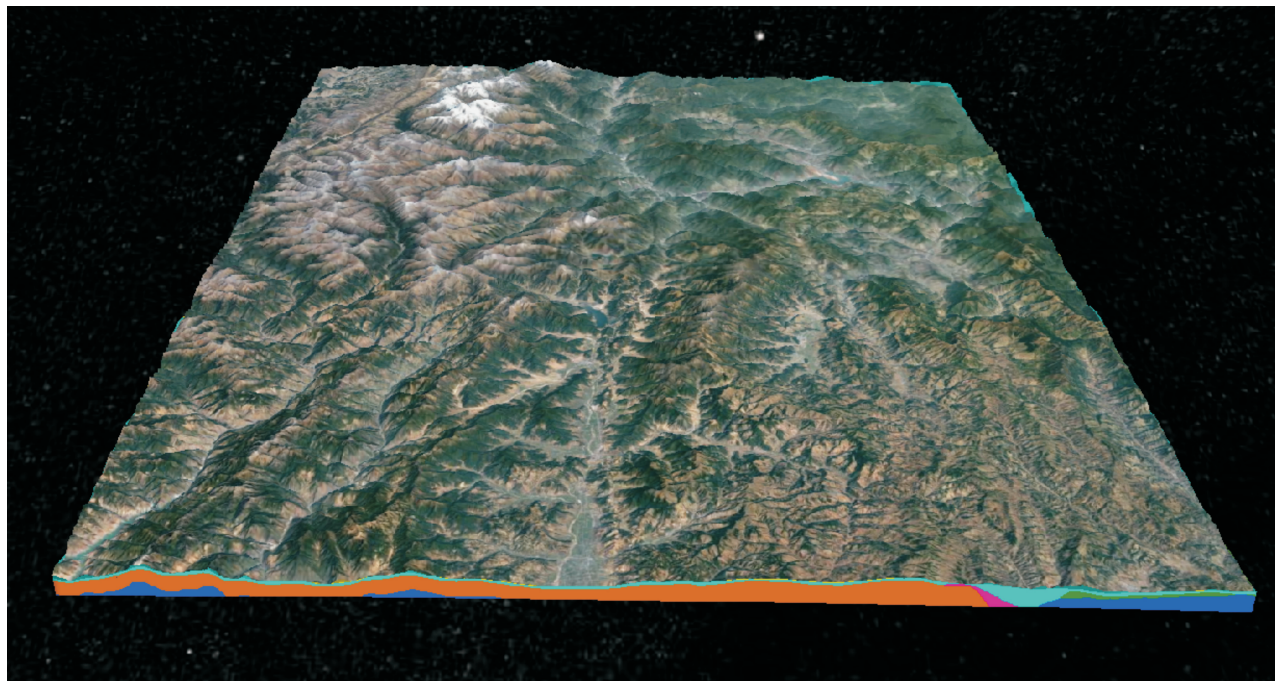


图 6 遥感影像和地质模型的融合图

Fig. 6 Fusion of remote sensing image and geological model

本项目应用遥感影像进行断层解译,发现了新的潜在断层;该潜在断裂构造起于点(经度:102°13′36.12″,纬度:28°34′33.96″),终于(经度:101°53′11.4″,纬度:28°18′03.96″)。通过高精度遥感高程信息对比,确定该潜在断层两侧的平均距离差为 95 m,初步判断该潜在断裂断距平均为 95 m。因为沿断裂线方向北侧高南侧低,同时参考附近相同走向的断裂倾向,初步判断其为东南倾向 45°,倾角 78°左右的逆向断裂。该解释成果已被应用于本项目构造建模中。

4 总结和展望

成都-昌都区域整体构造建模实践显示了新型三维地质建模方法的重要性。通过多源异构数据建模技术,不仅最大限度提高了地质资料的应用程度,而且极大提高了三维地质模型的准确度,为地质模型的应用打下了坚实的基础。通过大规模整体建模技术及模型数据库的建立,规范地质模型的标准,便于实现整体地质数据的一体化。通过网格剖分和属

性建模,第一次在该区域建立了属性模型,能够容纳各类地质属性,为量化大数据地质研究提供离散化的数据支撑。

展望三维地质建模技术的发展,应该围绕 2 个中心展开:①降低用户建模的成本,提供建模工作效率。②要提高模型的质量,更好更全面地满足各类用户的需求。

为满足第一个目标,应该利用人工智能、机器学习技术,将目前影响三维建模工作效率的人工环节(剖面解释、模型编辑等)用人工智能进行替代;另外,对消耗时间比较大的网格剖分和属性插值,引入云计算和并行计算技术,大幅度降低时间消耗,提高建模工作效率。将遥感解译和人工智能相结合是一条重要的技术路线,将已有的地质图件,特别是高精度的地质图件和遥感数据进行匹配,作为机器学习的大数据基础,建立表征遥感影像特征和地质构造特征的深度神经网络,实现将遥感影像资料扩展为基础地质调查、区域地质调查的一个重要数据来源。为满足第二个目标,应该持续的改进曲面建模算法、网格剖分技术、属性建模技术;发展适用于大规模地

质模型的数值模拟方法;在地应力模拟、地下水渗流模拟、流体压力模拟等领域研发出更多技术。

自然资源实物地质资料中心创建的重要地质钻孔数据服务平台目前通过地质云对社会公众发布了 110 万个重要地质钻孔数据,总进尺达 2.75 亿延米,覆盖全国 31 个省;结合遥感图像,运用本次新型建模方法,可以绘制一个完整详实的全国地下、地表三维展示实景;这对全国乃至全世界地质工作者及其他科研人员都是巨大的贡献。针对后续遇到的其他问题,我们将从技术与方法上进行跟踪改进。

参考文献(References):

李林. 基于 OpenGL 标准的地学信息可视化[J]. 西北地质, 2000,33(03):56-60.

LI Lin. Geological information visualization based on OpenGL standard [J]. Northwestern Geology, 2000, 33(03): 56-60.

李良平,胡伏生,尹立河. 鄂尔多斯盆地白垩系三维地质建模研究[J]. 西北地质, 2007, 40(02):109-113.

LI Liangping, HU Fusheng, YIN Lihe. Research on 3d geological modeling of cretaceous in ordos basin [J]. Northwestern Geology, 2007, 40(02):109-113.

王亚军,张明江,陈鲁. 物探数据在三维地质建模中的应用[J]. 西北地质, 2014, 47(03):91-100.

WANG Yajun, ZHANG Mingjiang, CHEN Lu. Application of geophysical data in 3D geological modeling [J]. Northwestern Geology, 2014, 47 (03):91-100.

杨波,管后春,杨潘,等. 基于三维 GIS 的第四系古河道沉积区工程建设适宜性评价研究[J]. 西北地质, 2021, 54(03):244-251.

YANG Bo, GUAN Houchun, YANG Pan, et al. Evaluation of engineering construction Suitability in Quaternary palaeochannel sedimentary area based on three-dimensional GIS [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(03): 244-251.

张伟,高倩,梁雷江. 基于 Petrel 技术的油藏三维可视化建模研究[J]. 西北地质, 2013, 46(03):191-196.

ZHANG Wei, GAO Qian, LIANG Leijiang. Research on 3d

visualization modeling of reservoir based on Petrel technology [J]. Northwestern Geology, 2013, 46 (03): 191-196.

李芳玉. 三维地质建模与 GIS 的结合研究[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(1):97-100.

LI Fangyu. Study of the integration of 3D geological modeling and GIS[J]. Geophysical and Geochemical Exploration Computing, 2011, 33(1):97-100.

朱德福. 改进三棱柱体剖分算法研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3):34-37.

ZHU Defu. Research on improved triangular prism Subdivision Algorithm [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3):34-37.

李想. 面向地学研究的六面体网格生成方法研究[J]. 南京师范大学, 2013.

LI Xiang. Research on hexahedral Mesh Generation Method for Geoscience Research [J]. Nanjing Normal University, 2013.

杨洋,潘懋,吴耕宇,等. 一种新的轮廓线三维地质表面重建方法[J]. 地球信息科学学报, 2015, 20(3):253-259.

YANG Yang, PAN Mao, WU Gengyu et al. A new method of 3d geological surface reconstruction with contour line [J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 20(3): 253-259.

李昌领,张虹,朱良峰. 单断层地质体真三维建模算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(10):3590-3594.

LI Changling, ZHANG Hong, ZHU Liangfeng. True 3D modeling algorithm of single fault geologic body [J]. Computer Engineering & Design, 2013, 34(10):3590-3594.

车德福,吴立新,殷作如. 一种基于 GTP 的复杂地质体真三维建模方法:岩柱体分区法[J]. 地理信息世界, 2008, 6(1):34-38+45.

CHE Defu, WU Lixin, YIN Zuoru. A true 3d modeling method for complex geologic body based on GTP: cylinder partition method [J]. Geographical Information World, 2008, 6(1):34-38+45.

刘亚静,李梅,宋利杰,等. 基于面向对象思想的矿体三维数据模型[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2012, 31(4):437-440.

- LIU Yajing, LI Mei, SONG Lijie, et al. Orebody 3D Data Model Based on Object-oriented Thought[J]. Journal of LnTU: Natural Science, 2012, 31(4): 437-440.
- 张志华, 侯恩科, 罗晓霞, 等. 一种新的三维巷道建模数据模型研究[J]. 金属矿山, 2011, 40(11): 128-131.
- ZHANG Zhihua, HOU Enke, LUO Xiaoxia, et al. Research on A New Three-dimensional Lane Construction Model [J]. Goldmine, 2011, 40(11): 128-131.
- 张志华, 侯恩科, 罗晓霞, 等. 巷道与地层交切建模研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(4): 496-499.
- ZHANG Zhihua, HOU Enke, LUO Xiaoxia, et al. Intersected Model Between Tunnel and Strata[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(4): 496-499.
- 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637-639.
- HE Huaijian, BAI Shiwei, ZHAO Xinhua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 637-639.
- 朱合华, 郑国平, 吴江斌, 等. 基于钻孔信息的地层数据模型研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(5): 535-539.
- ZHU Hehua, ZHENG Guoping, WU Jiangbin, et al. Study on ground data model based on drill hole information [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(5): 535-539.
- 徐磊, 吴立新, 车德福. 基于地层时序与属性语义的相邻钻孔地层连接与推理[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1): 1-4.
- XU Lei, WU Lixin, CHE Defu. Strata connection and reference between adjacent boreholes based on stratum sequence and semantics[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(1): 1-4.
- 向中林, 王妍, 王润怀. 基于钻孔数据的三维地质建模及可视化系统 3DGMS 的设计与实现[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 29(6): 746-752.
- XIANG Zhonglin, WANG Yan, WANG Runhuai. Design and implementation of 3D geological modeling and visualization system (3DGMS) based on borehole data [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2010, 29(6): 746-752.
- 朱良峰, 潘信, 吴信才. 三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 828-832.
- ZHU Liangfeng, PAN Xin, WU Xincan. Design and development of 3D geological modeling and visualization system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 828-832.
- 白世伟, 贺怀建, 王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2002, 19(1): 23-26.
- BAI Shiwei, HE Huaijian, WANG Chunxiang. 3-Dimension strata information system and information of geotechnical engineering [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2002, 19(1): 23-26.
- 张煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(3): 285-290.
- ZHANG Yu, BAI Shiwei. An approach of 3D stratum modeling based on tri-prism volume elements [J]. Journal of Image and Graphic, 2001, 6(3): 285-290.
- 夏清, 刘登忠, 石勇. 遥感图像三维地形景观可视化的实现——以西藏赛利普地区为例[J]. 地球信息科学, 2007, 9(5): 121-123.
- XIA Qing, LIU Dengzhong, SHI Yong. Realization of 3d terrain and landscape visualization in remote sensing image: A case study of Salipu area in Xizang Province [J]. Geo-information Science, 2007, 9(5): 121-123.
- Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(3): 547-555.
- Sousa A M O, Gonçalves A C, Mesquita P, et al. Biomass estimation with high resolution satellite images: A case study of Quercus rotundifolia [J]. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2015, 101, 69-79.
- Xiang D, Tang T, Hu C, Fan Q, Su Y. Built-up area extraction from PolSAR imagery with model-based decomposition and polarimetric coherence [J]. Remote Sens, 2016, 8, 685.