

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0409

王统,田宜平,罗莹莹,等.基于地质大数据与构造语义约束的断层建模[J].地质科技通报,2020,39(4):69-75.

Wang Tong, Tian Yiping, Luo Yingying, et al. Fault modeling based on the semantic constraint of geological big data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 69-75.

基于地质大数据与构造语义约束的断层建模

王统^{1a,1b,2}, 田宜平^{1a,1b,2}, 罗莹莹^{1a,1b}, 张睿^{1a,1b}

(1.中国地质大学(武汉) a.计算机学院; b.智能地学信息处理湖北省重点实验室, 武汉 430078;
2.自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵阳 550081)

摘要:断层作为一种重要的地质构造,在自然界中普遍存在。在地质体三维建模中,断层处理的难点主要在于数据获取不易。如今,在地质大数据条件下,可以利用不同地质语义约束来推测断层的产状。但由于断层构造往往十分复杂,要利用地质大数据对断层构造进行约束建模,需厘清断层的形态分类及其数据模型。通过研究断层的分类,提取出影响断层产状的要素,将这些要素作为断层数据模型的组成部分,在地质大数据挖掘中作为挖掘目标,形成断层地质语义信息表,为后续断层建模提供数据支撑。在此基础上,提出一种新的断层建模思路,即将断层看成一个整体,通过 Apriori 算法对断层地质语义信息表进行分类,找到每个断层的标准模型。然后,利用断层地质语义信息表对该断层模型进行几何形态约束,形成符合特定地质语义的断层模型。最后,通过断层牵引构造的平滑过渡,将断层镶嵌在已经建好的地层格架模型中,完成断层的三维建模。

关键词:断层建模;地质大数据;断层语义约束;地质模型切割

中图分类号:TP31

文章编号:1000-7849(2020)04-0069-07

收稿日期:2019-11-17

Fault modeling based on the semantic constraint of geological big data

Wang Tong^{1a,1b,2}, Tian Yiping^{1a,1b,2}, Luo Yingying^{1a,1b}, Zhang Rui^{1a,1b}

(1a.School of Computer Science; 1b. Hubei Key Laboratory of Intelligent Geo-Information Processing, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China;
2.Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, China)

Abstract: Faults, as an important geological structure, are ubiquitous in nature. In 3d modeling of geological body, the difficulty of fault processing lies in obtaining data. Nowadays, under the condition of geological big data, different geological semantic constraints can be used to predict the occurrence of faults. However, as fault structures are often very complex, it is necessary to clarify the morphological classification of faults and their data models in order to use geological big data for constraint modeling of fault structures. This paper studies classification of faults and extracts factors that affect occurrence of faults. These factors are taken as part of fault data model and as mining target in the big data mining of geology. They can constitute table of geological semantic information of faults to provide data support for subsequent fault mod-

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1711267);贵州省科技计划(黔科合支撑[2017]2951;黔科合支撑[2019]2868;黔科合支撑[2020]4Y039号;黔科合平台[2018]5618);贵州省地质勘查基金项目(2019-02号);贵州省地矿局科研项目(黔地矿科合[2017]2;黔地矿科合[2018]07);湖北省创新群体项目(2019CFA023)

作者简介: 王统(1993—),男,现正攻读计算机科学与技术硕士学位,主要从事三维地质建模研究工作。E-mail:1073163676@qq.com

通信作者: 田宜平(1973—),男,教授,主要从事地质信息技术、地质三维可视化、地质过程模拟研究工作。E-mail:yptian@cug.edu.cn

eling. On this basis, a new fault modeling idea is proposed, that is, fault is regarded as a whole, and section fault geological semantic information table is classified by Apriori algorithm to find standard model of each fault. Then, the fault model is constrained by geometric form by using the fault semantic information table to form a fault model with the specific geological semantics. Finally, through smooth transition of the fault traction structure, the fault is embedded in established stratigraphic framework model to complete three-dimensional modeling of the fault.

Key words: fault modeling; geological big data; fault semantic constraint; geological model cutting

1 断层三维建模现状

地质空间具有非直观性、非参数化、非均质性的特征^[1], 很难用简单的地质数据去直接描述。并且地质数据所表达的地质现象、地质过程、地质作用都不是孤立存在的, 它是多个因素相互制约、相互影响共同完成的, 从而地质数据具有异常的复杂性^[2]。

断层三维建模及可视化的难点主要体现在以下方面: ①地质断层数据类型多样、分布稀疏、获取艰难, 导致断层建模的有效数据提取不易^[3]; ②断层通常以组合形式存在且形态多变, 用现有的数据模型很难完整地描述与表达; ③断层引起的地层不连续导致地层面重构困难^[4]。

针对上述问题, 学者们提出了如下 3 种建模方法: ①基于地层恢复的断层建模法, 又称为整体建模法。该法先假设断层不存在, 根据所有的采样点数据进行整体三维地质建模, 获得没有断层的三维地质模型, 然后从数据仓库中提取断层数据并嵌入该三维模型中, 重构地质体发生断裂后的真实模型。该方法可有效地解决断层数据较少、断距不大的地质体的断层建模问题, 比较适合于断距较小、断层面较简单的断层建模^[5]。②基于分区插值的断层建模法, 又称为局部建模法。该方法首先以断层为界, 把整个地质体分为若干个区块, 然后分别对各区块进行三维建模, 最后按照一定关系进行组合, 形成一个完整的三维地质模型。该法适合于采样点数据较多、断距较大的地质体建模。③断层与地层统一构模法。该方法根据数据特点, 首先对每一个地层进行整体拟合, 同时考虑断层线的约束作用, 从而生成合理的地层层面; 然后将断层面与地层面进行切割处理, 调整交线上的点, 并将其约束到断层面上; 最后根据上、下层面及侧面形成完整的实体模型。

这 3 种方法各有所长, 根据地质资料的丰富程度可以采用不同的建模方法。但在工区更大的项目中, 如“玻璃贵州”等省级区域的地质建模, 以上方法就暴露出普适性低, 需要根据地质资料丰富程度来选取不同的建模方法, 增加了工作量。若能利用地质大数据开发一套全自动的建模技术, 将大大减轻工作者的压力。

目前, 断层构造的模拟和表达是复杂地质体构模技术的重点^[6], 虽然已经取得了很大进展, 形成了以表面模型、实体模型和混合模型为代表的地质体几何建模^[7]。但在地质大数据高速发展的今天, 多数研究成果还缺乏利用地质大数据的思维, 缺少整合多源地质数据服务断层模型建模的技术路线^[8-10]。

关于断层性质和特征信息的提取, 传统做法是通过人工方式直接从地质记录本和物探剖面上获取。在断层较少且后期变形叠加较弱的构造简单区, 这种人工方式的有效性显著且工作简便。但是, 在断层较多且后期变形叠加较强的构造复杂区, 这种人工方式的有效性较差且工作麻烦。改进的办法在于直接利用地质记录文本进行断层数据挖掘。地质记录文本是指野外工作现场的岩心编录本、野外记录簿, 以及室内样品测试、分析和鉴定报告。野外现场主要包括岩石露头、探槽、钻孔(井)、浅井、矿井、坑道、矿坑等, 野外现场记录主要包括野外露头和岩心的观察、描述和记录。此外, 还包括重力、磁力、电法和地震等地球物理勘探记录, 以及地球化学勘探等记录。室内分析和样品测试数据, 是通过对野外现场采集的样品进行室内岩矿鉴定、化学分析和物理—力学测试获得的。所有这些都是地质现象的第一手资料, 是地质现象最直接的数据, 提供了研究区地层、岩石、矿物、断层和褶皱等的全方位、多角度、多主题原始数据, 具有原始、真实、科学、准确等优点。对这些地质文本进行多主题的挖掘, 可保证信息提取的准确性。

地质科学大数据以“玻璃地球”为有效载体, 在“玻璃油田”等一系列实际工程中, 为支撑地质建模及可视化发挥重大作用^[11]。该新地学观以查找和揭示多种地质要素之间的关联关系为主要目标^[12-13], 然后在关联关系中探寻因果关系, 其研究方法以“全体”数据为依据, 用数据驱动, 通过大数据挖掘来发现新的地质知识^[14-16]。随着高性能计算机和大数据处理技术的发展, 我们已经有可能通过多种数据挖掘方法, 直接在结构化、半结构化和非结构化一体化存储的数据库集群中, 直接进行包括断层在内的多主题信息挖掘, 满足三维地质建模和“玻璃地

球”建设的需要。

地质大数据具有显著的多来源、多类别、多维度、多时态、多格式和多主题的特征^[17]。随着传感器实时监测等高新技术在地质勘查或生产开发中的应用,形成了动态与静态并存、多源异构的地质时空大数据^[18]。不同数据源的地质数据也侧重表现不同的地质属性,每个新的数据流都增加了地质信息的维数,并增加了其表示的复杂性^[19]。前人针对不同类型的地质数据,也进行了多种数据结构的研究。针对不同形式的数据源,进行了丰富的建模方法研究^[20-21]。笔者所探讨的利用地质大数据约束断层产状的建模方法,其要领是:通过对研究区各类地矿勘查点源数据库进行数据挖掘,首先厘清断层分类,构建不同类型断层的标准断层信息表;继而利用不同类型地质数据,按照所描述的断层产状差异,确定模型断层的不同产状数据,然后制定出断层模型的断层信息表;最后利用断层信息表,在三维空间中描绘断层产状,具体流程见图1。

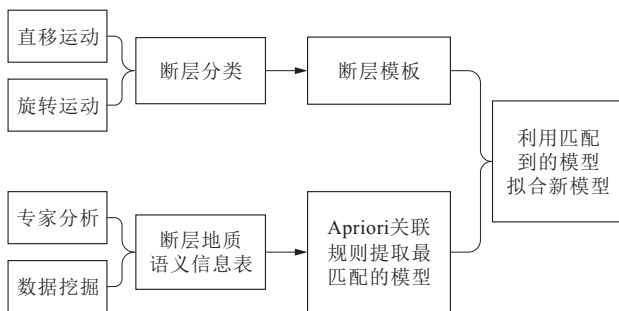


图1 思路流程图

Fig.1 Flow chart

2 断层分类及其判据

断层是地壳中分布极为广泛的地质构造类型,是深部流体上升到地表的重要通道,并且流体可与断层岩进行相互作用,使断层岩发生一系列物理化学反应^[22]。由于断层带的地质结构不稳定,在地质灾害防控领域,断层也是研究的重点^[23-24]。断层规模较大者主要分布在板块边缘、造山带、克拉通地块边缘、盆地边缘和基底等。受构造运动的长期影响和叠加改造,断层种类繁多,根据断层两盘的相对运动方向可划分为正断层、逆断层、平移断层、旋转断层和更复杂的斜向滑动断层。大型断层往往控制盆地形成演化、岩浆作用和成矿作用,中、小型断层控制矿床、矿体的产状,活动断层则影响地壳和建筑物场地的稳定性^[25]。在沉积地层中,断层的分类见图2所示。

每一种断层因滑距、断距、倾角和断层面变化等几何要素的差异,在地壳中形成了空间形态多姿多

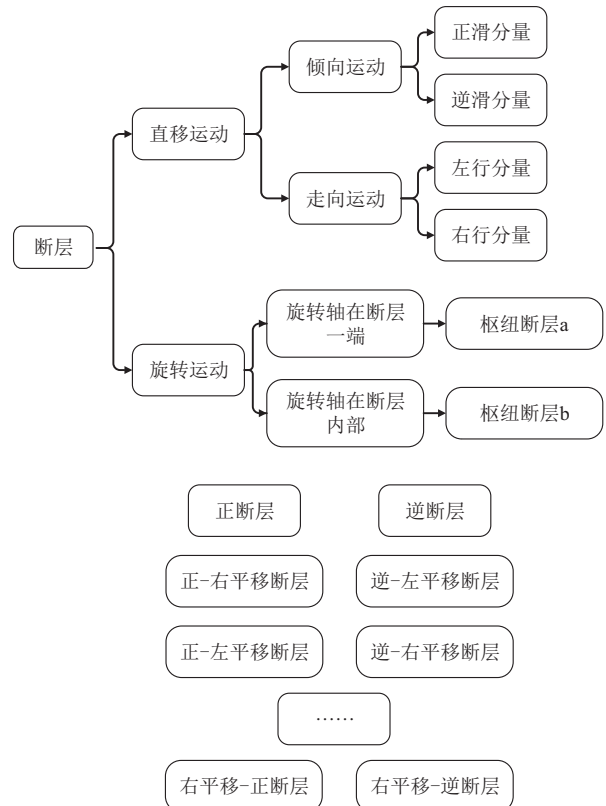


图2 断层分类

Fig.2 Fault classification

样的断层,对断层进行细致的分类描述,有助于我们在地质大数据中挖掘断层的形成分布规律、寻找断层产状的判据,对于断层在三维地质模型中的正确刻画具有积极意义。有关断层的这些分类描述,隐含并分散于勘查区所有钻孔岩心描述和地表露头描述中,并且均以非结构化的文本形式存在于数据库中。

断层分类的基本依据是,断层两盘的相对运动方向。断层面两盘的相对运动有直移和旋转之别,据此可将断层分为直移断层和枢纽断层2种。其中,直移断层还可以分为倾向滑动断层和走向滑动断层(图3)。倾向滑动断层再依上下盘的相对上升和下降,分为正滑断层和逆滑断层(图3)。走向滑动断层按照滑动方向,分为左行断层和右行断层(图3)。在此基础上,按照正滑断层、逆滑断层、左行断层和右行断层的滑动分量的组合,以及位移分量的主次关系,共计演变出32种不同类型的断层。这些类型,体现了断层的高度复杂性和非同质性,可作为从地质大数据中挖掘断层类型判据的标志。在从地质大数据中挖掘断层类型的信息时,首先应当注重断层的位移分量。显然,尽可能多地定量刻画断层两盘的相对位移信息,对于在三维地质建模中进行断层空间约束和合理分类具有重要意义^[26-28]。

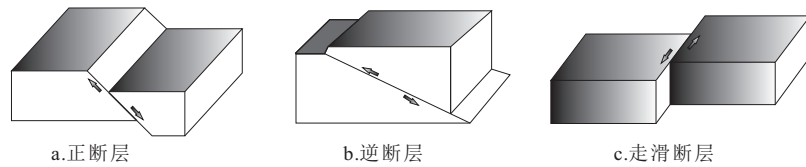


图3 标准断层

Fig.3 Standard fault

3 断层模型约束和类型匹配

3.1 断层地质语义信息表

断层的几何形态复杂,其空间展布状态不可能用单一的数学公式进行准确刻画。同时,断层数据的获取较为困难,以断层面走向为例,往往需要结合钻孔岩心描述和地震剖面解释等多元数据才能确定^[29-30]。因此,在进行精细断层模型建模时,需要利用地质大数据并结合断层分类标准,才能实现合理的空间模拟。由于同类断层之间有许多共性,只要将同一断层系统中的断层单体作为断层建模的最小单元,利用规范化的数据结构,对各个断层单体的可变参数进行调整,便可以拟合出符合实际的断层模型。

断层在计算机中的识别和表达,离不开体现断层几何要素的数据结构模型。作为断层系统的组成部分,断层单体的可变参数包括:断层类型、断点位置、起始位置、分层数目、分层岩性、深度、倾角、倾向、旋转角和地层断距,等等。对断层单体的刻画,可选取其中某些参数进行数据规范化整合,即将每一种断层的描述性语言,通过地质大数据挖掘的方式记录下来,便可构成统一的断层地质语义描述表(表1)。

表1 断层地质语义信息

Table 1 Fault geological semantic information

字段名称	说明	数据类型
Fault_ID	断层名称	Long Char
Fault_Attribute	断层属性	Char
Fault_Level	断层级别	Int
Fault_Position_X	断层插入 起始位置	(Double, Double, Double)
Fault_Position_Y	断层插入 终止位置	(Double, Double, Double)
Fault_Strike	断层走向	(Double, Double)
Fault_Dipangle	断层地层倾角	Double
Fault_Interval	地层断距	Double
Fault_Ver_Interval	铅直地层断距	Double
Fault_Hor_Interval	水平地层断距	Double
Fault_Nor_componet	正断层分量	Double
Fault_Thr_componet	逆断层分量	Double
Fault_Lef_componet	左行断层分量	Double
Fault_Rig_Component	右行断层分量	Double
Fault_Rot_Position	旋转轴位置	(Double, Double)
Fault_Rot_Angle	旋转倾角	Double
Fault_Pin_Position	断层尖灭位置	(Double, Double)

地质大数据往往以结构化、半结构化和非结构化形式存储,数据挖掘过程主要采用文本挖掘的手段。首先经过文本预处理将不同形式资料统一成计算机可以识别的可挖掘文本,可以采用抽取特征词进行量化的方法来表示文本信息,进而利用文本分类进行文本映射,找出与断层相关的集合,最后进行模式评估,提高文本挖掘的准确率。最终可以用一种非监督的方式获得一个与断层相关的数据集合。

将通过多种手段从地质大数据挖掘出来的相关信息,填入断层地质语义信息表中,便可以构建起一个地区所有断层的结构信息表。实现了这种具有地质语义的构造描述表的统一构建,可进一步为后续自动构建该地区断层模型提供数据支撑。

断层单体作为断层自动建模的最小单元,需要根据断层地质语义信息表进行自适应调整,才能使其空间形态符合地质体的实际情况。

3.2 断层线框模型的约束

在盆地分析中,断层面的提取是通过地震解释剖面进行的。在二维地震剖面中,断层面的投影往往是折线或曲率半径极大的曲线。以断层两侧地层在倾向上的相对运动方向判断,图4中断及各套地层的同一条断层,处处均为逆断层。从断层两侧相应层位的厚度关系及各个层位的垂向断距看,该逆断层仅造成第④沉积盖层两侧厚度变化,而没有造成第②和第③沉积盖层的厚度变化,而且该断层仅

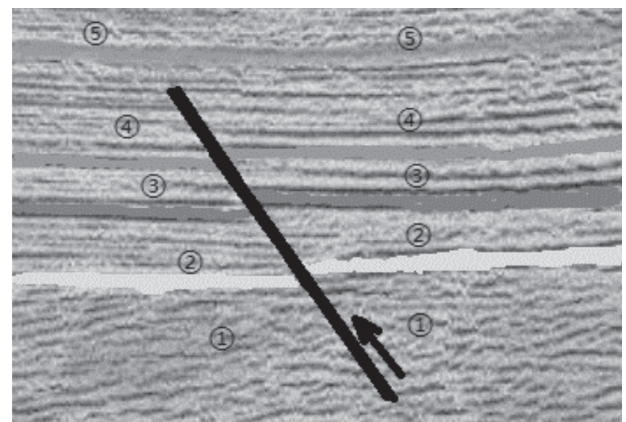


图4 地震解释图像中的同沉积逆断层

Fig.4 Synsedimentary thrust faults in seismic interpretation images

切断第④沉积层的下部。因此,该逆断层应属于第④沉积盖层发育早期形成的同沉积逆冲断层。

断层面是一种不规则的空间曲面,一个断层面往往由多段倾向不同的断层面构成。断层面的识别可以利用反射地震解释剖面来实现,其要领是先根据拐点将断层面离散成多段,从而将一个复杂的空间曲面离散成多段简单的空间平面。这样做可以有效地简化断层的建模操作,然后通过断层单体的拼接,便可完成复杂断层的构建。断层模型的约束可通过每个断层的地质语义信息表来完成。

通过地震剖面数据的计算,还可以得出每一断层两侧相应地层的断距。如前所述,地层断距分为水平断距、垂向断距和斜向断距,相互之间存在直角三角形关系,可利用地层倾角进行换算(图5)。

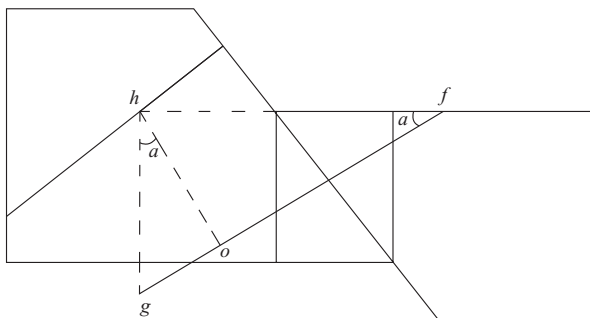


图5 断层倾角、断距之间的关系

Fig.5 Relationship between dip angle and distance of faults

图5中, a 为岩层倾角, ho 为地层断距, hf 为水平地层断距, hg 为铅直地层断距。三者之间可以通过三角函数关系互相反演,也可以通过测量获得其中任意一种断距,再反演其他2种断距。

在数字地质体的空间结构中,可以以断层面为界限,将上盘和下盘看作2个具有空间台体形态的独立对象,再通过空间坐标距离计算得到相应位置关系,来识别上、下盘在断层面上的接触关系。然后,根据断层地质语义信息表,确定断层走向以及伸展方位。在断层接触面上,通过倾向和走向运动分量的计算,可以确定断层类型以及断层位移距离;而通过旋转位置的计算,可以确定旋转中心,进而由旋转倾角确定旋转分量。最后对断层尖灭位置处做平滑处理,得到三维断层模型。

显然,根据断层地质语义信息表规定的两盘断距、断层面走向、断层旋转点和旋转倾角,以及各方向平移分量,可以完整地构建出基于断层单体聚合和集成的研究区三维断层系统空间模型。

断层系统的三维空间模型,通常采用线框模型

来构建和表达,即在标准断层线框模型的基础上,利用断层地质语义信息表进行约束,进而构建出符合要求的断层模型。采用统一的地质语义结构表,有利于判定实际断层模型与标准断层模型的相似度,并根据该相似度对所建立的实体模型做出调整。

(1)通过实际断层与标准断层的地质信息表模糊比对查询,匹配出隶属度最大的断层模板模型。

(2)选中所归属的断层模板模型,将断层地质信息表中的参数信息赋值给标准模板。

(3)标准模板按照参数进行空间形态的变化,拟合出符合地质语义信息表要求的断层模型。

按照上述思路,共设置了7个不同方位的运动算子,分别为上、下、左、右、前、后和旋转算子,对断层上下盘之间的几何关系进行表述(图6)。

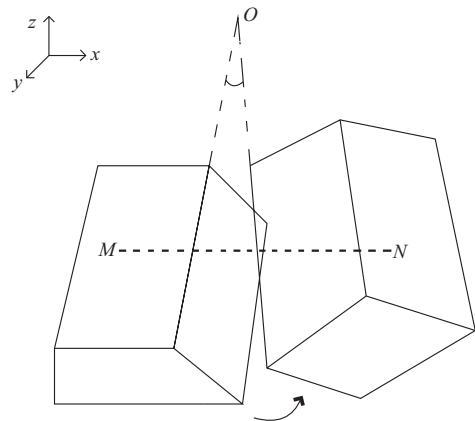


图6 具有约束的断层模型

Fig.6 A fault model with constraints

3.3 断层模型的快速匹配

根据断层地质语义信息表,断层模型在几何形态上应该满足第1节中32种断层模型中的一种。因此,在地质大数据背景下,通过海量的多源多类异质异构数据的挖掘得到断层地质语义信息表之后,急需解决的问题便是如何快速进行模型匹配。

得益于规范化的地质语义表达结构,为了快速匹配到最接近的断层模型,同时兼顾大规模数据库中快速比对的问题,可以采用在Apriori算法基础上改进的频次分析法^[31]。

Apriori算法是数据挖掘的一种算法,主要用于进行大数据关联规则的挖掘,同时也可以反映数据之间潜在的依赖性和关联性,因此可以用来进行结构化多参数问题的快速匹配。基于Apriori的频次分析法是通过迭代找出所有数据集中的最大频繁项集,再根据最大频繁项集推理出关联规则(图7)。

Apriori算法用于筛选关联规则,其核心思路是将所有参与划分规则的因素分类,如断层地质语义信息表中包含 k 项用于描述断层种类的指标,根据

最小支持度,筛选出其中相同的 $(k-1)$ -项集,从 $(k-1)$ -项集产生新的候选 k -项集,此时的 k -项集包含 $k-1$ 项,这样逐级产生候选项集以筛选出规则。

为使算法具有良好的分类效果,将标准断层模型的数据集,称作训练标准集。在随后的逐次扫描过程中,将会依次产生频繁1-项集、2-项集、... n -项集。利用频繁项集的最大隶属度原则,可将不同地质语义信息表归纳到不同组的断层模型中去。在此基础上,将分组的频繁数据集与训练标准集进行聚类,便可以快速完成地质语义信息表分类。实践结果表明,基于这样的思路和算法,能够大大地减少大规模处理断层模型分类的工作量,从而有效地提高断层快速三维建模的效率。

在实际应用中,断层分布极其广泛,根据以往的经验,在传统建模中,每个断层都需要建模人员一一确认,进而在三维可视化软件中将其呈现出来。这不仅费时费力,还对建模人员的专业素养提出很高要求。而利用 Apriori 算法进行关联规则快速匹配,可以很快将大量断层地质语义信息表进行分类,迅速找出匹配程度最高的断层模板。

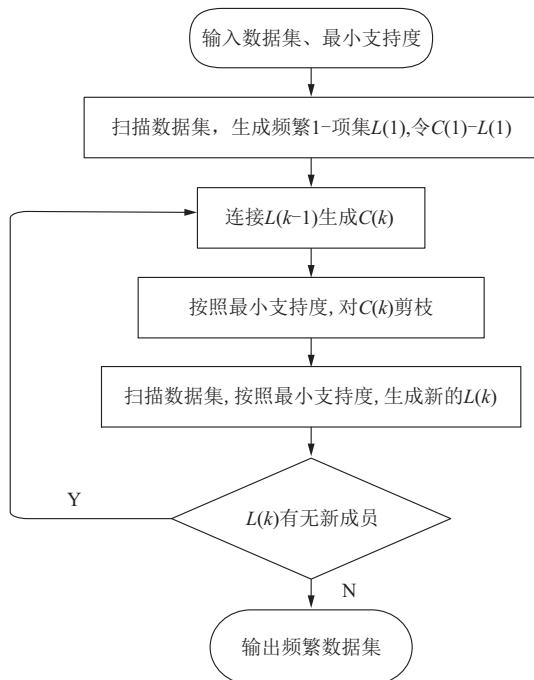


图7 基于 Apriori 的频次分析法流程图

Fig.7 Flow chart of frequency analysis based on Apriori

4 断层模型镶嵌

在数字地质体模型中,断块可以看作是经过断层模型切割的地层模型。所以从某种意义上说,断层模型可以通过地层模型的变化来构建。

断层模型构建好后,还需要镶嵌到整体地层模型中去。由于断层模型上、下盘存在着相对位移,在断层两侧的地层往往会出现一些特殊的变形现象。在将构造模型嵌入地层模型中时,需要加以正确的描述和表达。例如,在裂陷盆地中,同生断层上盘相邻断层处往往发育平滑的逆牵引构造(图8)。掌握逆牵引构造的这种平滑过渡特征和规律,便可正确地将同生断层模型与盆地地层模型协调地镶嵌在一起,使其在盆地三维地质体模型中得到完整表达。

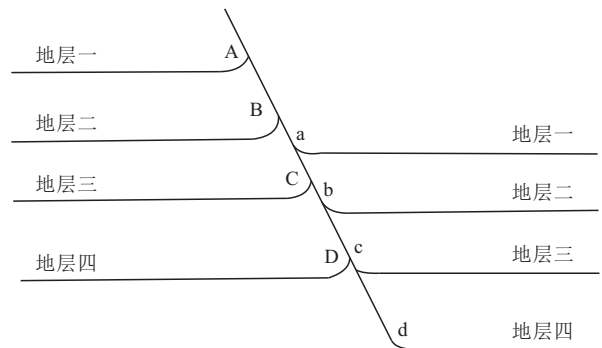


图8 断层逆牵引构造

Fig.8 Fault reverse traction structure

逆牵引构造作为同生断层的一种伴生构造,主要受盆地拉张裂陷作用的影响。同生断层作为张应力释放点,在断层面发育处的张应力最小,而且随着地层线远离断层,张应力逐渐增大。作为简化处理,逆牵引构造的地层层面形变曲线可用抛物线 $\Delta h = k \Delta x^2$ 来近似描述,其中, Δh 为逆牵引构造距离原地层面的高度, Δx 为逆牵引构造距离原地层的长度。实践结果表明,利用上述抛物线方程,可以近似而合理地描述同生断层的逆牵引形变特征,从而可以和谐地将同生断层模型嵌入盆地三维地层模型中。

5 应用实例

基于 QuantyView 三维可视化平台,选取包含断层区域的地质资料进行试验。

经前期调查,以深圳前海地区作为实验区域,通过结合深圳市断层分布图,用前海地区钻孔数据和地震解译图像来确定断层产状,得到断层模板。再利用待建模区域的断层地质语义信息表,将相关断层描述信息通过代码填入程序中,经过 Apriori 频次分析,找出最契合的标准断层模板,经过数据约束,并对断层的逆牵引构造进行平滑处理,在可视化界面得到经过约束的断层模型,截切后的实验结果如图9所示。

实践结果表明,引进地质大数据思想之后,可充分利用全体地质数据,保证了三维建模的数据类型

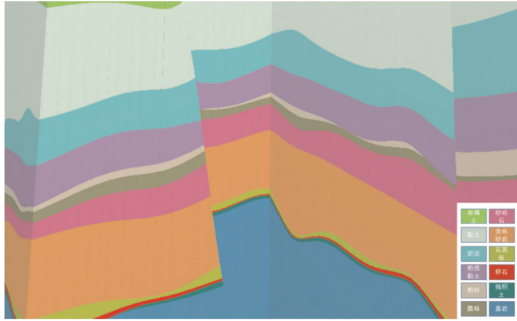


图9 约束后的断层模型

Fig.9 Constrained fault model

齐全、信息齐备,并且建模速度快、便于进行空间分析,可准确地再现断层模型的产状特点,并且有助于复杂地质体建模的自动化。

6 结 语

断层构造由于其空间形态及分布的复杂性,是开展三维地质建模的难点之一。笔者利用地质科学大数据数据量大、刻画地质信息全面的特点,探讨并提出了采用大数据挖掘技术,提取包含断层地质语义的信息,进而使用统一范式的地质语义去约束断层模型等方法,以期得到更加符合实际意义的三维数字断层模型。最后,通过对断层两侧地层特殊变形特征的数学建模,以及断层模型对地层模型的切割方式,实现断层模型与地层模型的合理且和谐镶嵌。

地质大数据在地质建模领域的应用越来越广,这种科学研究的第四范式不仅帮助人们在海量数据中挖掘有价值的信息,而且通过建立基于全体地质数据的空间数据模型,有助于细致全面地分析地质空间。今后,大规模时空数据在地质信息领域的应用将愈发广泛,对未来地质大数据的实时存储、实时计算和实时展示提出新的要求。未来利用云计算处理地质数据,建立地质大数据的“存储仓库”以及透过“玻璃地球”等多元的展示方式,地质大数据将更加快速直接地指导我们的工作,在地质勘探、资源普查、地灾预测等重要应用场景中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 何珍文,吴冲龙,刘刚,等.地质空间认知与多维动态建模结构研究[J].地质科技情报,2012,31(6):46-51.
- [2] 翁正平.复杂地质体三维模型快速构建及更新技术研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2008.
- [3] 陈麒玉.基于多点地质统计学的三维地质体随机建模方法研究:以闽江口地区第四纪沉积体系建模为例[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
- [4] Keith T. Challenges and trends for geological modelling and visualization[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2006, 65: 109-127.
- [5] 朱良峰,潘信,吴信才,等.地质断层三维可视化模型的构建与

实现技术[J].软件学报,2008,19(8):2004-2015.

- [6] 朱良峰,潘信.地质断层三维构模技术研究[J].岩土力学,2008,29(1):274-278.
- [7] 李忠权,刘顺.构造地质学[M].北京:地质出版社,2010.
- [8] 武强,徐华.虚拟地质建模及可视化[M].北京:科学出版社,2011.
- [9] 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,2015,17(3):253-259.
- [10] 唐丙寅,吴冲龙,李新川.一种基于 TIN-CPG 混合空间数据模型的精细三维地质模型构建方法[J].岩土力学,2017,38(4):1218-1225.
- [11] 吴冲龙,刘刚,王力哲,等.基于大数据的城市地质环境智能监管思路与方法[J].地质科技通报,2020,39(1):157-163.
- [12] 田宜平,刘维安,张夏林.基于等角度变化比例投影的矿体轮廓线自动匹配方法研究[J].地质科技通报,2020,39(1):175-180.
- [13] 刘刚,吴冲龙,何珍文,等.面向地质时空大数据表达与存储管理的数据模型研究[J].地质科技通报,2020,39(1):164-174.
- [14] 陈国旭,田宜平,张夏林,等.基于勘探剖面的三维地质模型快速构建及不确定性分析[J].地质科技情报,2019,38(2):275-280.
- [15] 张文彪,段太忠,刘彦锋,等.定量地质建模技术应用现状与发展趋势[J].地质科技情报,2019,38(3):1-9.
- [16] 吴冲龙,刘刚,张夏林,等.地质科学大数据及其利用的若干问题探讨[J].科学通报,2016,61(16):1797-1807.
- [17] 田宜平,刘志峰,赵攀,等.水电三维地质模型中各地质要素的建模方法[J].地质学刊,2012,36(3):320-325.
- [18] 田宜平,毛小平,张志庭,等.“玻璃油田”建设与油气勘探开发信息化[J].地质科技情报,2012,31(6):16-22.
- [19] 吴冲龙,刘刚.大数据与地质学的未来发展[J].地质通报,2019,38(7):1082-1088.
- [20] 吴冲龙,刘刚.“玻璃地球”建设的现状、问题、趋势与对策[J].地质通报,2015,34(7):1281-1287.
- [21] 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:自然科学版,2003,31(5):535-539.
- [22] 严俊,魏迎奇,蔡红,等.基于钻孔数据的三维地质模型智能建模方法[J].水力发电,2015,41(2):25-28.
- [23] Benito B R, Alberto C, Agustin M D, et al. A novel geometric approach for 3-D geological modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2014, 73: 551-567.
- [24] 陈明娥,涂江涛.基于规则库的三维地质自动建模技术研究[J].测绘通报,2017(9):120-125.
- [25] 张慧,刘刚,陈麒玉.带约束的体元属性插值方法与可视化表达[J].地质科技情报,2017,36(6):267-272.
- [26] 倪凤娟,郭福生,黎广荣,等.内蒙古塔木素地区断层活动性研究:来自断层泥及围岩主量元素及碳氧同位素的证据[J].地质科技情报,2019,38(4):166-174.
- [27] Gong J, Cheng P, Wang Y. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(4): 391-404.
- [28] Fan Q, Ju N P, Xiang X Q, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence-A case study in Guizhou, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 474-481.
- [29] 王静.基于 QuantyView 和多源数据的滑坡体三维地质建模技术研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2013.
- [30] De Rienzo F, Oreste P, Pelizza S. Subsurface geological geotechnical modeling to sustain underground civil planning[J]. Engineering Geology, 2008, 96(1): 187-204.
- [31] 王柏林.基于关联规则的数据挖掘方法的研究[D].武汉:华中科技大学,2017.