



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

三维地质隐式建模

Li



主要内容

国内研究现状

隐式建模的意义

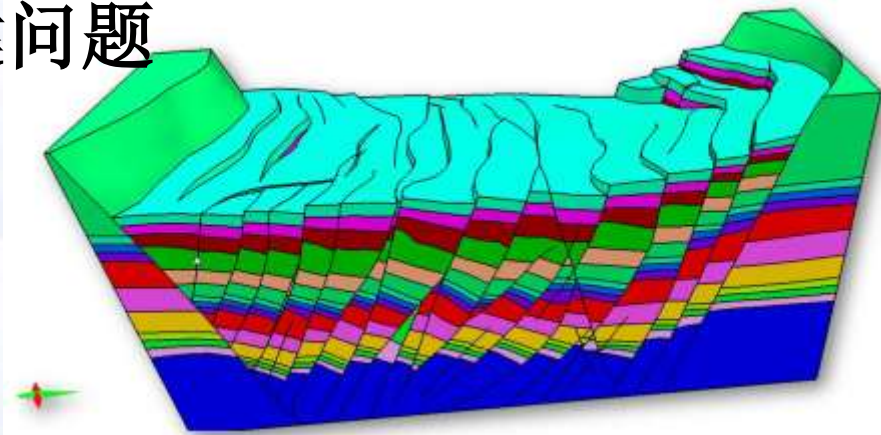
隐式建模的一般流程

隐式建模的基本原理

隐式建模与机器学习



地质建模前需自问的七个关键问题



1. 自己是否明确为什么要建模型？
2. 自己是否做了足够的了解地质背景和沉积环境的功课？
3. 自己是否收集和验证了所有的相关数据/信息（包括历史数据、类似物、硬数据、软数据，等等）？
4. 是否所有的专业都参与了建模的目标设定和计划过程？
5. 从概念模型中提取的信息格式是否可以被建模软件所理解？
6. 自己是否有相关的专业知识、对建模技术的理解，更重要的是有时间来构建这个模型？
7. 自己是否设置了建模将会对油田提供什么样的理解/操作的正确期望？



国内研究现状

通过知网期刊文献阅读，隐式地质建模在国内的研究目前较少。

Houlding (1994)提出**三维地学建模**的概念。Lajaunie et al. (1997)建立的**势场(potential-field)方法**是隐式地质建模的核心方法。

东北大学的**郭甲腾**、吴立新（中南大学）

北京大学的潘懋

中南大学的邹艳红

中国地质大学（武汉）的张夏林（计算机学院）、花卫华（信工学院）



隐式建模的意义

研究三维地质建模方法、开发实用的三维地质建模软件系统、建立反映实际地质情况的三维地质模型，不但能够满足实际的工程需求，解决**油气勘探开发**、矿产资源勘查、矿山开采设计、城市地质、地质灾害防治、**地下水模拟**、**岩土工程**和**水利工程**勘察等应用领域的实际地质问题(李兆亮, 2016)。

获取钻孔数据的成本较高,在一定的研究区域内往往只能获得有限数目的钻孔资料,这就需要最大限度地利用这些数据**所蕴涵的信息量**,尽可能多地**加入专家的经验与解释**,构建相对精确的地层模型。另外,从钻孔资料揭示出来的地层分层参数只在**该钻孔的有限范围**（孔直径）内有效,各个钻孔之间，并无相应的关联参数。

李兆亮, 潘懋, 韩大匡, 等, 2016. 三维构造建模技术研究. 地球科学, 41(12): 2136-2146.

朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 26-30.



隐式建模的意义

三维构造建模的流程是一个自上而下的线性过程（图5）。在建模过程中，一旦某个步骤出现问题或者需要修改，可能整个流程都需要重来一次。在实际建模过程中，随着对地质认识的加深，三维构造建模也就成为一个反复更新的过程。这样就会耗费大量的时间和人力，而且也不利于模型的更新。

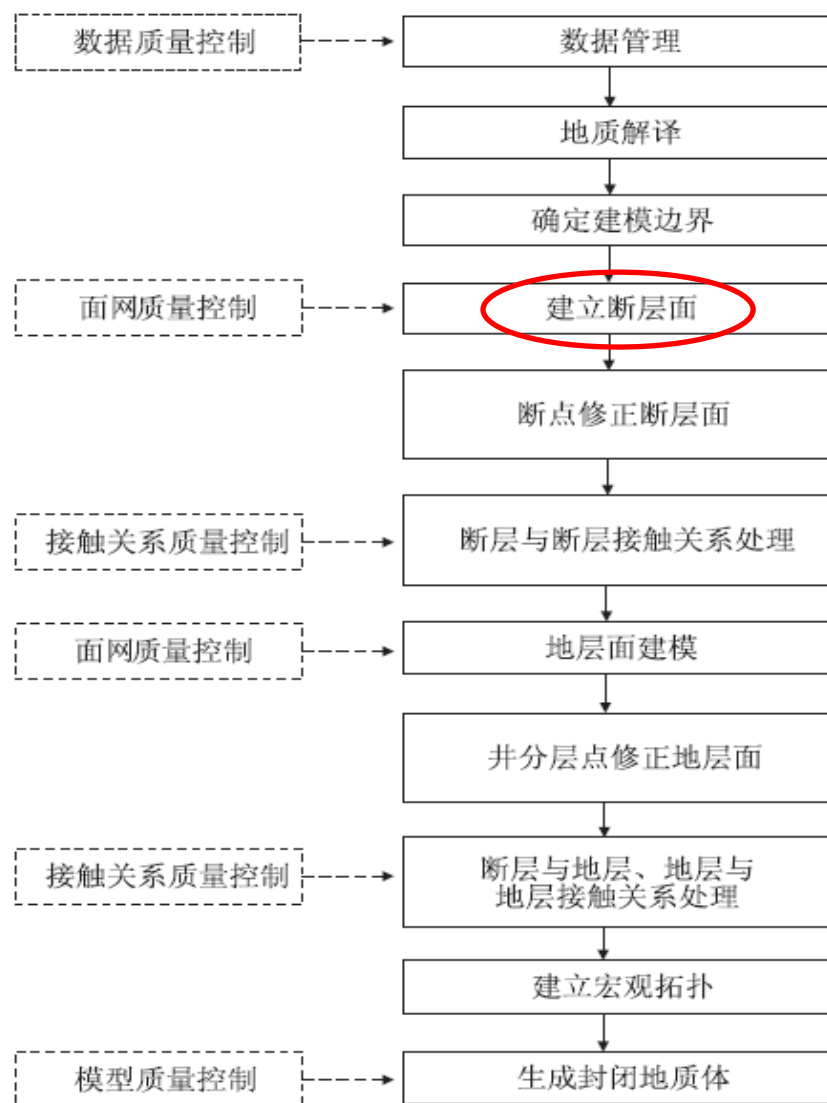


图 5 三维构造建模一般性流程



隐式建模的意义

比较一下传统的显式建模与隐式建模的效果差异(郭甲腾, 2016):



图4 基于剖面连接的矿体显式模型

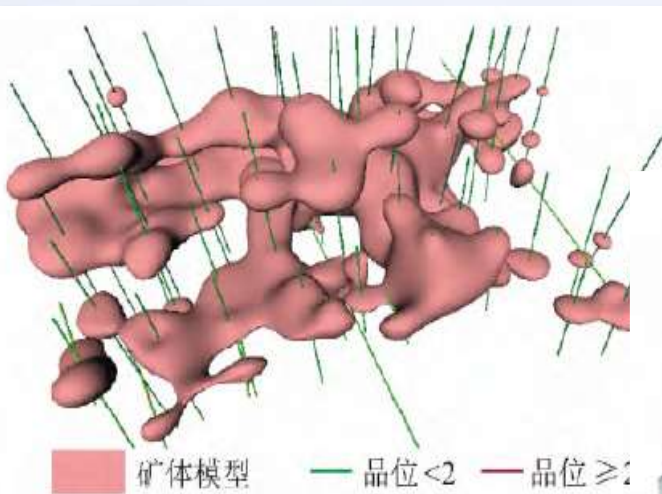


图5 Hermite 径向基隐函数圈定的矿体模型

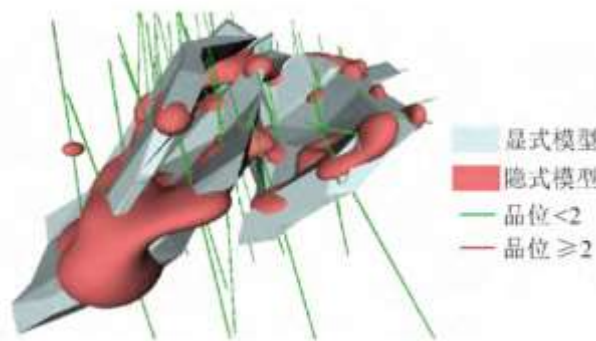


图6 矿体显式与隐式模型对比

隐式建模是基于插值算法得到曲面，较显式建模的更光滑。



隐式建模的意义

基于钻孔数据的地质建模，在建模之前需要进行大量人工处理，即建模所需约束数据多为地质人员手动提取，地质规则约束获取难度大，且需要花费地质人员大量的时间和精力，基于手动提取进行地质建模的操作为半自动化隐式建模，效率不高。

隐式建模凭借自动生成（较少的人工干预）、快速适应新数据、实时动态建模以及结果精度高的特点，已经成为建模领域不可或缺的技术。国内外多个地质建模软件均开发了隐式建模模块，如LeapFrog、Geomodeller、Gempy等。

王博，贺康，钟德云. 基于钻孔数据的地质体隐式建模约束规则自动构造方法. 黄金科学技术, 2021, 29(3): 345-354.

郭甲腾, 等. 一种三维地质体模型的隐式剖切方法. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1766-1773.

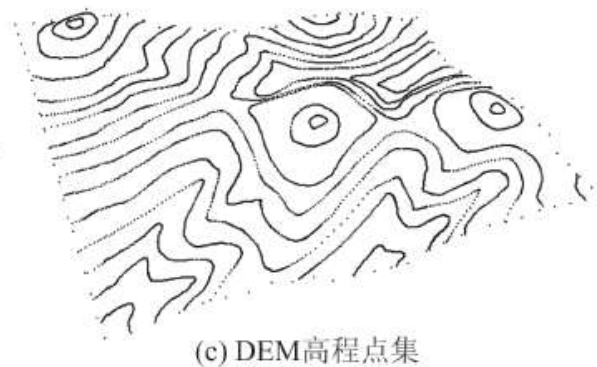
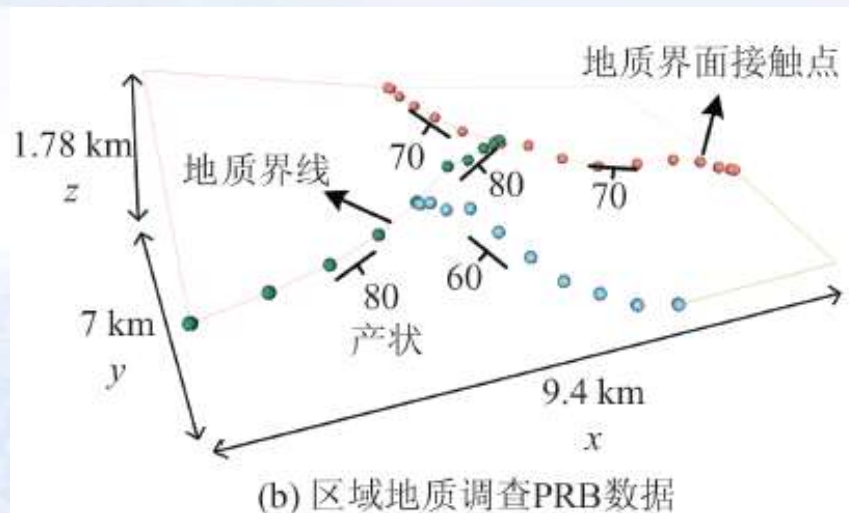
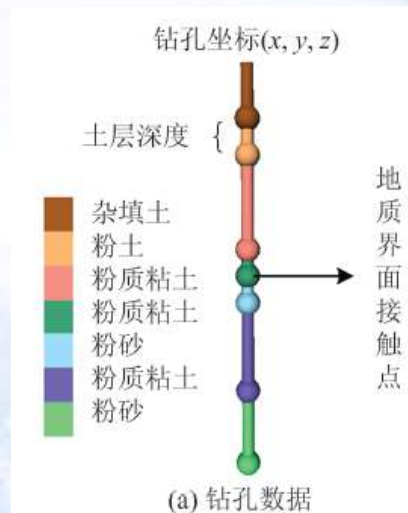


隐式建模的一般流程

建模的源数据

基于地质点、分段路线、点间界线（**point-routing-boundray, PRB**）数据和**钻孔数据**等地质调查源数据，引入Hermite径向基隐函数（HRBF）构建地质界面，并基于移动四面体的隐式函数网格化方法提出了一种新的隐式剖切方法。

地质界面点在岩土勘察钻孔数据中为地层分界点，在区域地质调查**PRB**数据中为地质界线点。



隐式建模源数据



隐式建模的一般流程

对钻孔数据和区域地质调查PRB数据，建立了地质界面模型，如图2。

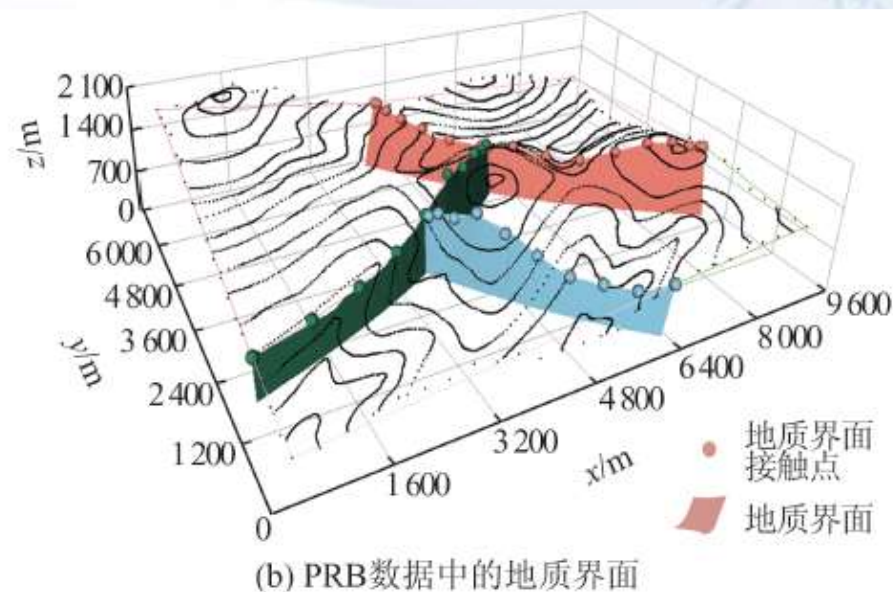
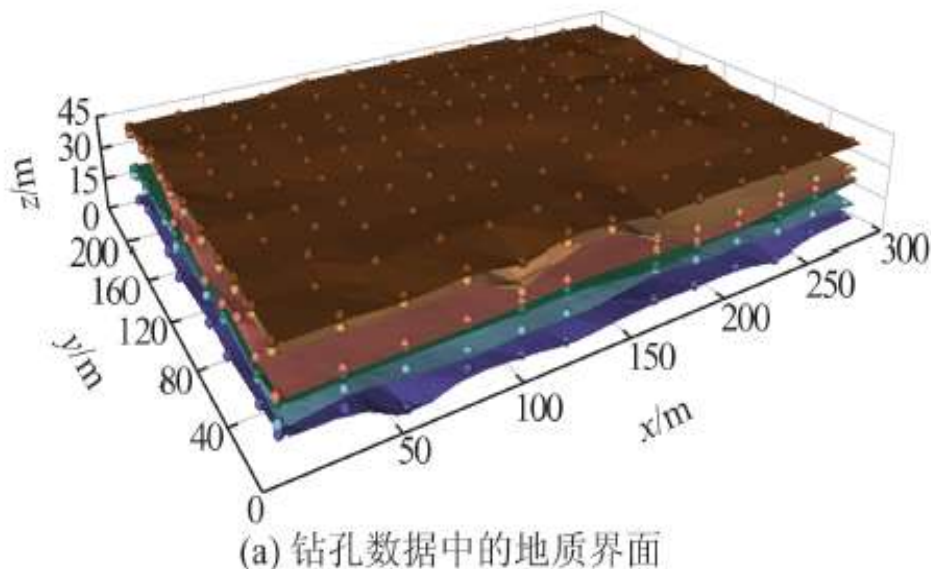


图2 地质界面隐式模型



隐式建模的一般流程

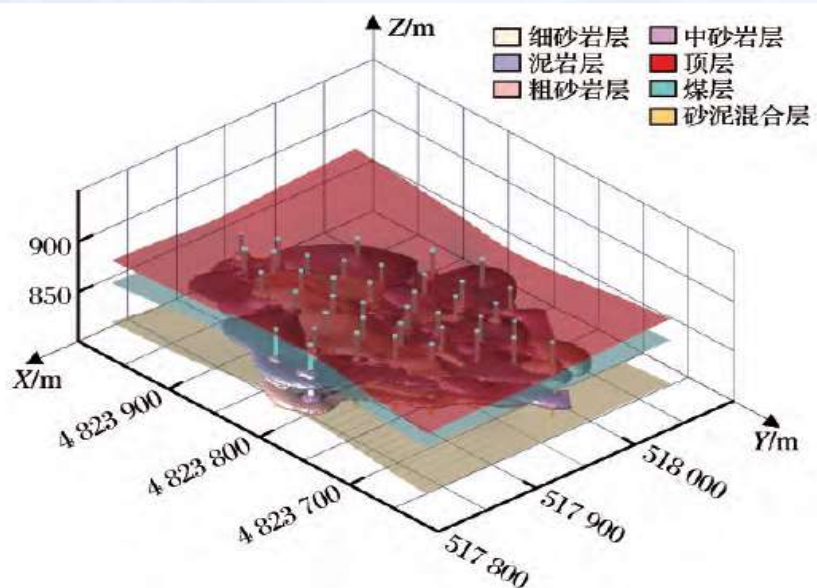


图 10 三维地质表面模型效果图

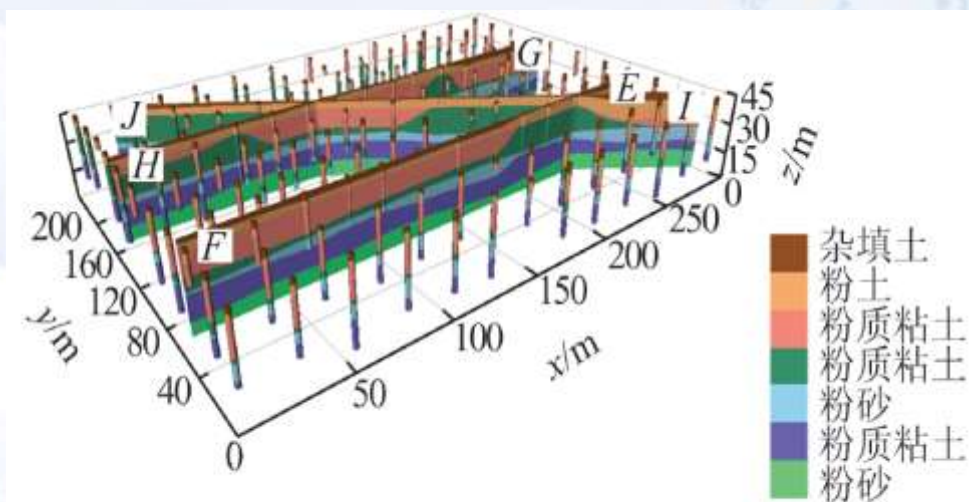


图 9 某钻孔数据剖切实验图

最终，建立网格化的三维地质模型及剖切面视图。



隐式建模的基本原理

1 地质规则约束自动构造方法

地质体隐式建模的流程主要分为3个步骤：

构造地质规则约束、隐式函数求解和隐式曲面重构。

隐式曲面的插值求解是建立在地质采样点集所表示的插值约束的基础上。而在隐式曲面的构建问题中，原始的采样点集最终都需要转化为相应的插值约束和建模规则。

将隐式建模所需数据集划分为两类，即插值约束和建模规则，统称为地质规则约束。



隐式建模的基本原理

1.1 地质规则约束

插值约束为构造隐式函数插值方程的约束条件，比如用于限制地质界面和形状的点约束、梯度约束和切向约束等。从地质建模的角度来看，插值约束由地层的产状特征来表述。

隐式建模插值所需采样点集 $(x_i, G_j), i, j = 1, 2, \dots, N$ ，一般为 2 种类型，即点

数据 x_i 和梯度数据 G_j 。

点数据 x_i 为不同地质界面之间的分界点，梯度数据 G_j 为垂直于每个地质界面的极化单位矢量，等效为 3 个偏导数 $\partial Z(x_j)/\partial x, \partial Z(x_j)/\partial y, \partial Z(x_j)/\partial z$ ，表达式如下：

$$\partial Z(x_j)/\partial x = G_j^x, \partial Z(x_j)/\partial y = G_j^y, \partial Z(x_j)/\partial z = G_j^z$$

式中： G_j^x 、 G_j^y 和 G_j^z 分别为地质空间任一点 x_j 处在 x 、 y 和 z 方向上的梯度分量。



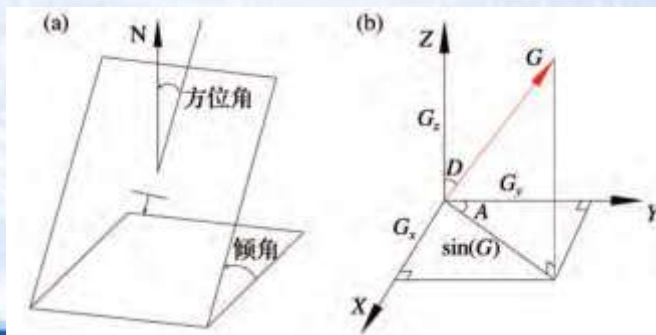
隐式建模的基本原理

1.1 地质规则约束

梯度数据用来进一步约束地质模型的三维空间形态，梯度分量可由地质空间中一点处的方位信息（方位角-**azimuth**、倾角-**dip**和极性-**polarity**）表示，如图1所示，二者转换关系如下：

$$\begin{cases} G_j^x = \sin(D) \times \sin(A) \times Polarite \\ G_j^y = \sin(D) \times \cos(A) \times Polarite \\ G_j^z = \cos(D) \times Polarite \end{cases}$$

式中：**D为倾角**，即水平线与最大倾线之间的角度；**A为方位角**，即最大倾线相对于磁北方向的夹角；**Polarite为极性**（+1或-1）信息，用来确保方向的一致性，当沉积层极性为正，代表从老到新的方向；当侵入体极性为正，代表从外部到内部的侵入。

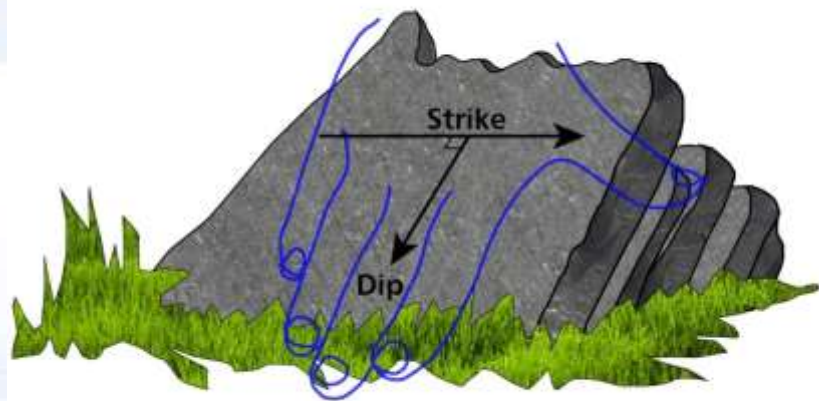
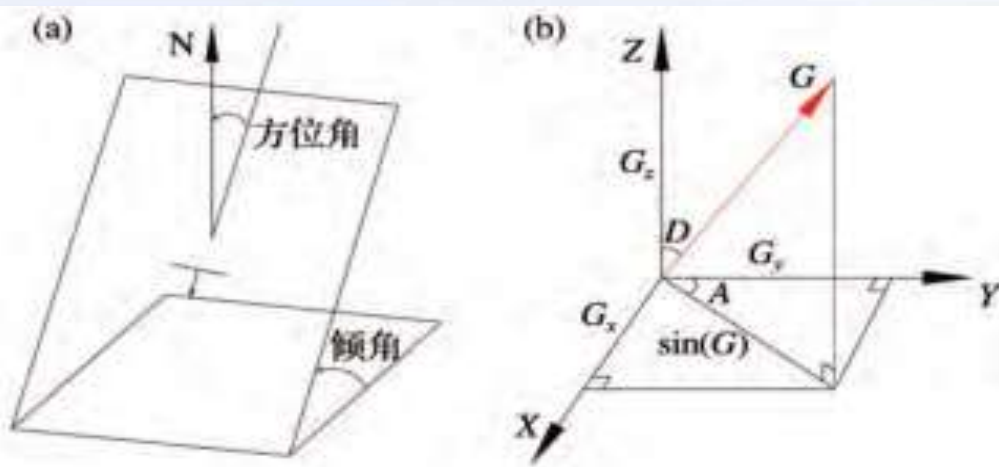




隐式建模的基本原理

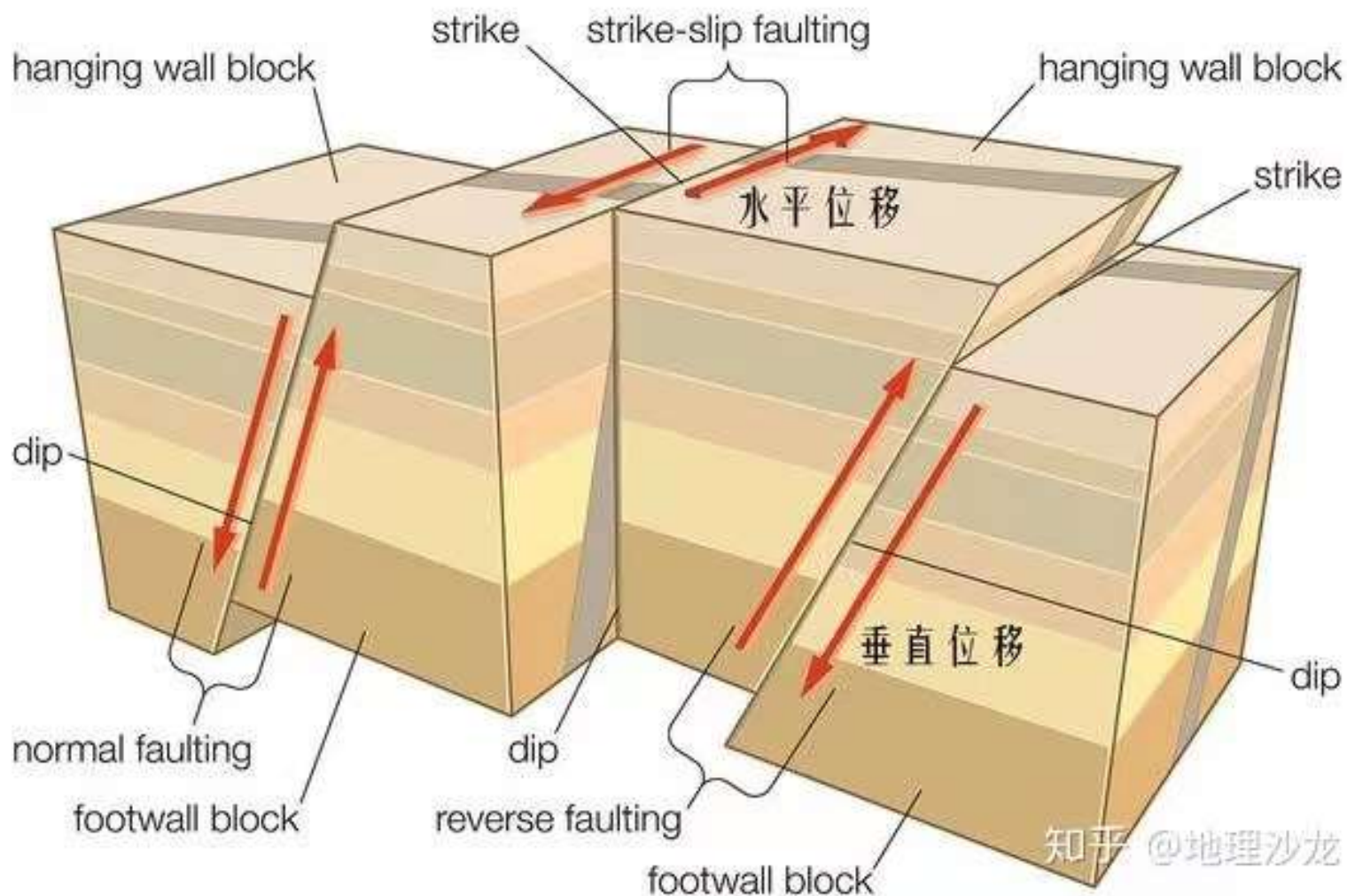
1.1地质规则约束

方位信息由地质空间任一点处的方位角、倾角和极性组成，因此按照传统地层产状的计算方法可得到空间任一点处的方位角和倾角，之后根据地层属性（沉积层或侵入体）获得相关极性，进而可转化为梯度数据并构建相应的插值约束。



(a) 产状信息（方位角和倾角） (b) 梯度矢量在3个坐标轴上的投影

图1 梯度数据和方位信息关系图



知乎 @地理沙龙



隐式建模的基本原理

1.1地质规则约束

(2) 建模规则

建模规则为用于构建完整三维实体模型各个子势场间的组合规则。从地质建模的角度来看，一般采用地层序列和地层关系来表示完整地质体各个地质界面间的组合规则。建模规则是限制多个地质界面间延展趋势的主要约束条件。

Calcagno et al. (2008)定义了3种基本的势场组合规则来表示地层序列。

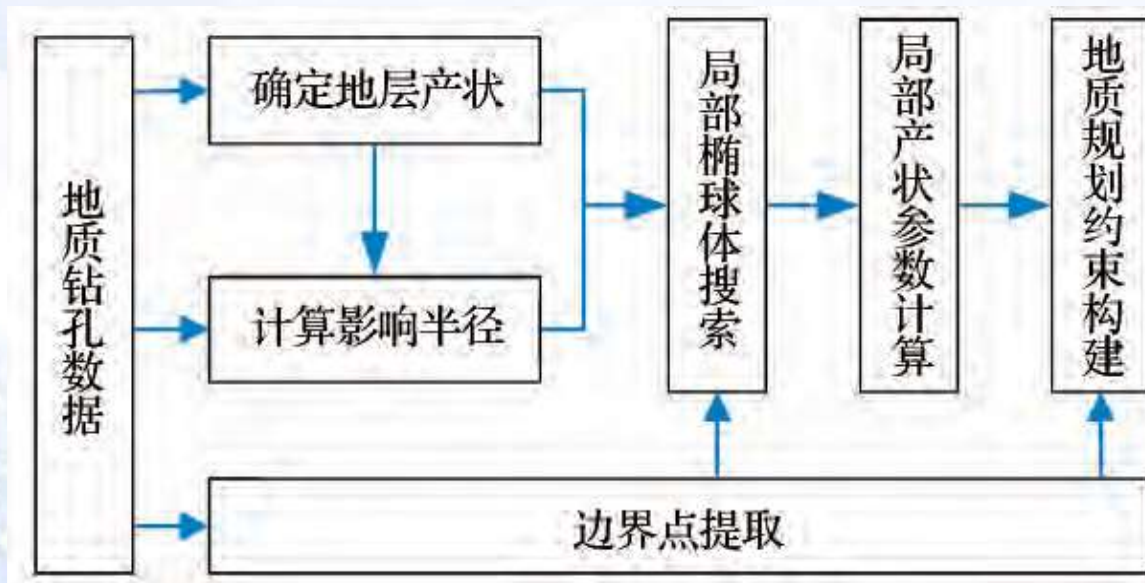
○ ○ ○ ○ ○ ○



隐式建模的基本原理

1.2 地质规则约束构造流程

地质界面特征参数是由边界点坐标和局部产状参数组成。由于边界点坐标为不同地层之间的分界点，基于原始钻孔数据可直接获取，因此，对于隐式建模所需地质规则约束的自动构建，关键是局部产状参数的提取和量化，具体方法流程如图2所示。

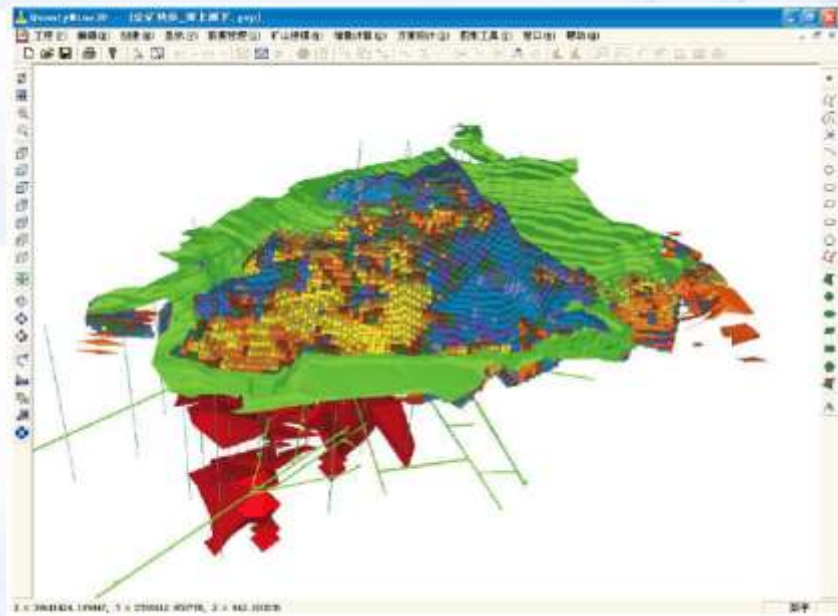
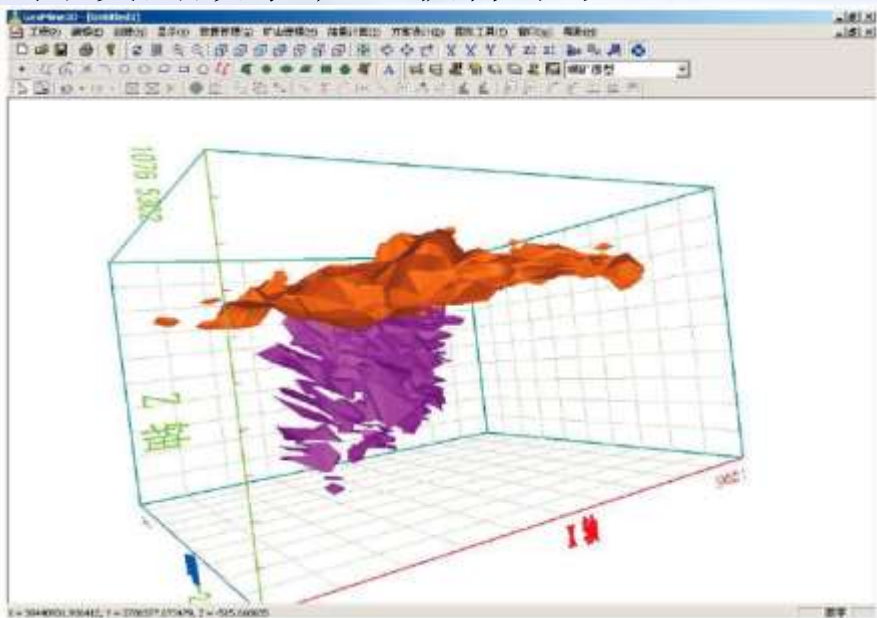


地质规则约束自动构建流程



地质建模软件-数字矿山软件(QuantyMine)

QuantyMine是由中国地质大学（武汉）和紫金集团矿业股份有限公司联合研制开发的数字矿山软件系统。



矿体三维块体模型

张夏林, 吴冲龙, 翁正平, 等, 2010. 数字矿山软件(QuantyMine)若干关键技术的研发和应用. 地球科学, 35(2): 303-310.

李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 地质科学大数据背景下的矿体动态建模方法探讨. 地质科技通报, 2020, 39(4): 59-68.



隐式建模的应用案例（GemPy的国内使用案例）

对新疆某地下铀矿进行三维地质建模试验，在此区域的三维地质模型中共包含40条钻孔，如图7（a）所示，钻孔中包含5种不同的岩性，使用不同颜色来表示。针对原始地质钻孔数据，按照上述方法分别进行全局产状参数和局部影响半径的计算，在进行局部椭球体搜索时，沿走向、倾向和厚度方向的半径分别设定为40，40，10m，依照上述方法获得插值约束所需邻域边界点集，如图7（b）所示，之后分别提取不同地层的采样点集，共包含546个点数据和2 041个梯度数据。

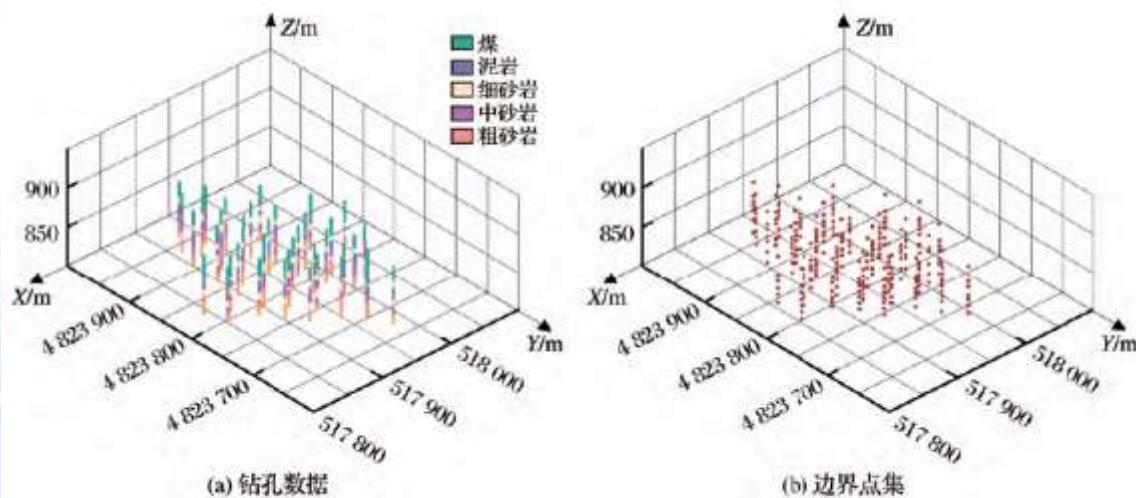


图7 钻孔数据与边界点集图

王博，贺康，钟德云. 基于钻孔数据的地质体隐式建模约束规则自动构造方法. 黄金科学技术, 2021, 29(3): 345-354.



隐式建模的应用案例（GemPy的国内使用案例）

最后通过势场法和Hermite径向基插值进行单个地层曲面的求解，借助DIMINE平台（中南大学研发的数字矿山系统）进行可视化。图8(a)为泥岩层势场法和HRBF法叠加显示效果图；图8(b)为粗砂岩层势场法和HRBF法叠加显示效果图。

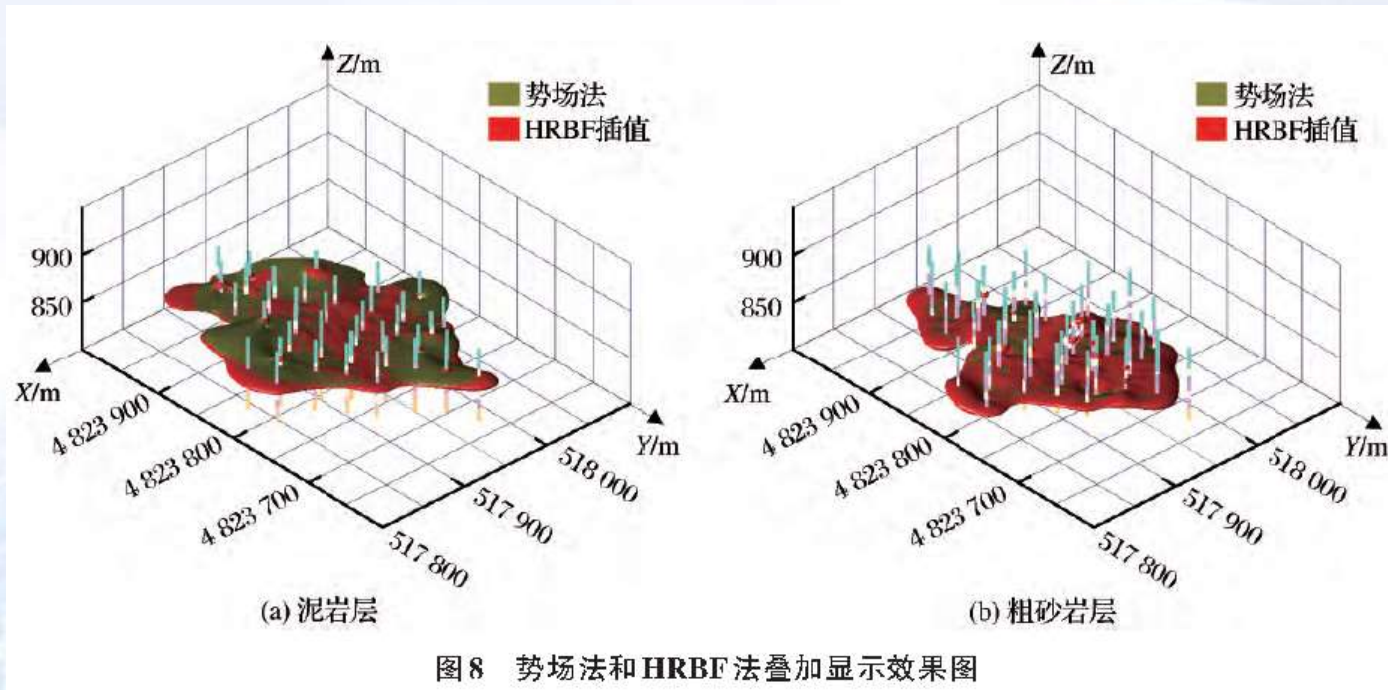


图8 势场法和HRBF法叠加显示效果图

以上为单一地层的构建，对于复杂形态地质模型的构建，需要进行多势场组合约束。



隐式建模的应用案例（GemPy的国内使用案例）

作者使用GemPy进行复杂形态模型的求解。具体建模方法如下：如图9所示，首先在GemPy代码中输入提取的点数据和梯度数据，然后设置所建模型的边界大小以及地质体的精度（分辨率），按照地质年代顺序设置模型构建层序，指定各地层序列关系（表1），最后通过势场法进行插值求解。

表1 地层序列规律及序列关系

地层序列	地层层序	序列关系	地层属性
细砂岩层	8	Erode	侵入体
泥岩层	7	Erode	侵入体
粗砂岩层	6	Erode	侵入体
中砂岩层	5	Erode	侵入体
顶层	4	Onlap	沉积层
煤层	3	Onlap	沉积层
砂泥混合层	2	Onlap	沉积层
基岩	1	Onlap	沉积层

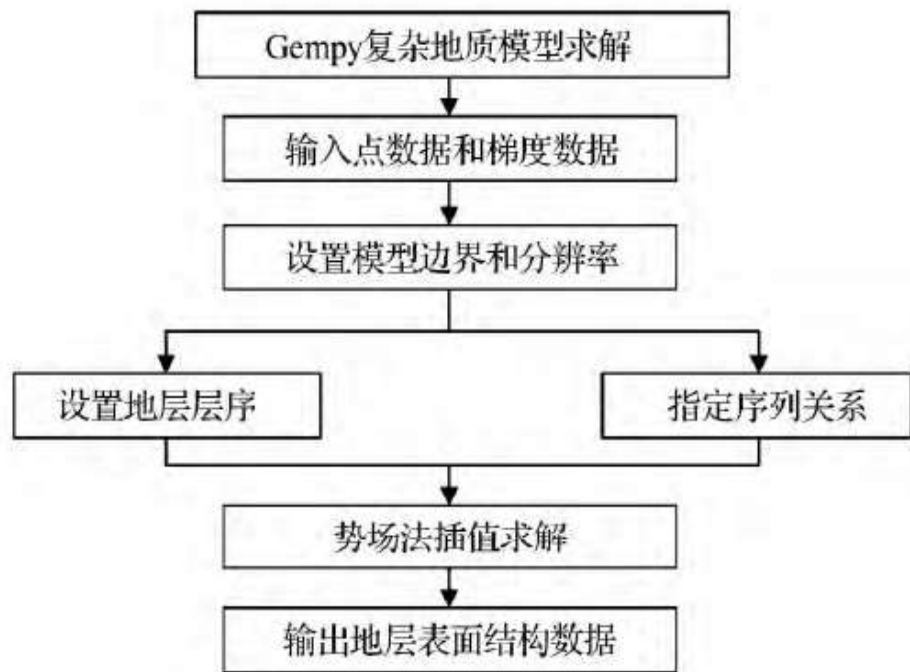


图9 GemPy复杂地质模型求解技术路线图



隐式建模的应用案例（GemPy的国内使用案例）

通过开源代码Gempy进行三维地质模型的求解，可获得表征地层表面的结构数据（**Delaunay三角网的顶点坐标和序列号**），之后把地层表面数据转换为DIMINE可识别的.off文件，在DIMINE平台进行可视化操作，建模结果如图10所示。

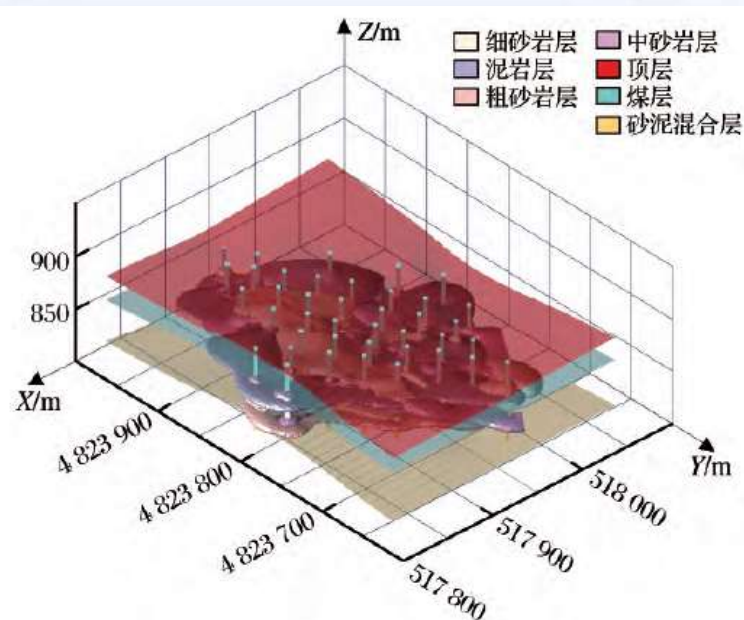


图10 三维地质表面模型效果图

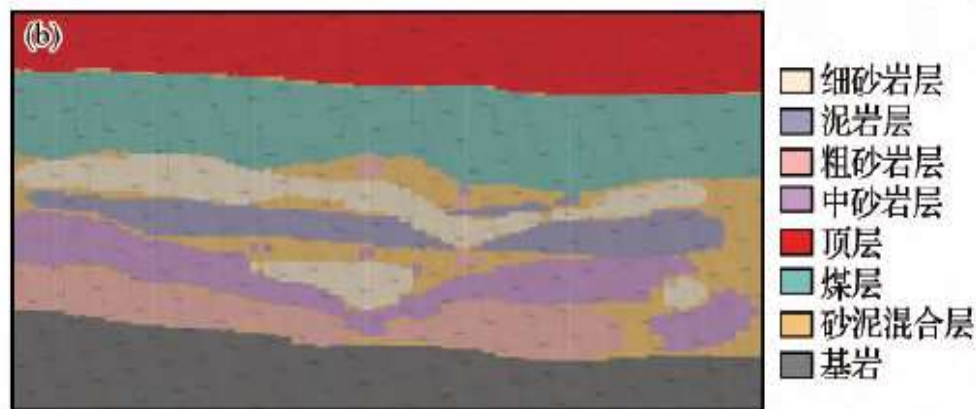


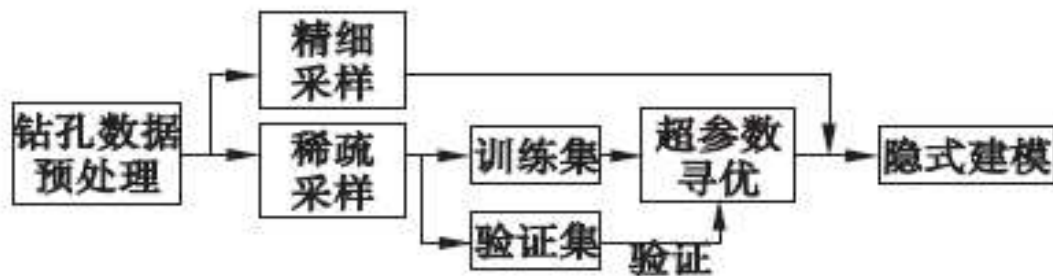
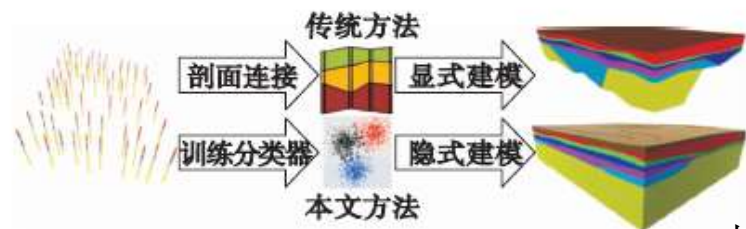
图11 三维地质模型剖面图



隐式建模与机器学习

隐式建模一般需要比较密集的钻孔数据资料作为基础。当钻孔数据比较稀疏时，可使用机器学习的方法代替插值算法。

GemPy可以使用Tensorflow和Theano机器学习框架。



基于机器学习的钻孔数据隐式三维地质建模流程

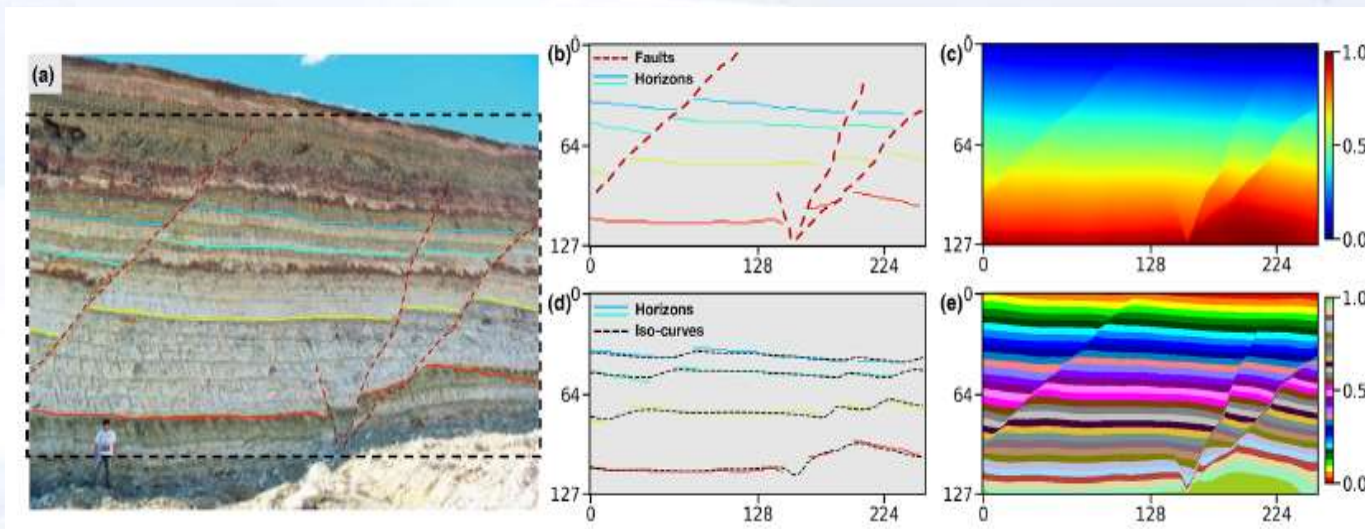
郭甲腾等(2019)在上述算法基础上，基于Scikit-learn和Keras开源机器学习库以及Unity 3D引擎，采用沈阳某区域的岩土工程勘探钻孔数据开展了隐式三维地质建模实。

郭甲腾，刘寅贺，韩英夫，王徐磊. 基于机器学习的钻孔数据隐式三维地质建模方法. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(9): 1337-1342.



隐式建模与机器学习

中国科大的Bi Zhengfa et al. (2022)使用PyTorch的CNN算法与地质建模。



2D地质露头：手绘及地层拟合

Bi Zhengfa, et al. DeepISMNet: three-dimensional implicit structural modeling with convolutional neural network. Geosci. Model Dev., 15, 6841-6861, 2022



中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

中国地质大学



软件

技术动态

新闻

解决方案

透明地球

关于我们

位置：首页 > 产品 > 产品简介

产品简介

深探地学建模软件

构造建模

属性建模

网格化

地应力模拟计算

三维构造演化

大工区整体建模平台

透明地球系统

产品简介

网格天地自主研发了三款软件产品：深探地学建模软件、大工区整体建模平台与透明地球系统，被广泛的应用于地球科学相关行业，如石油勘探与开发、城市地质调查、基础地质调查、矿产勘探与开发、地质灾害预警与治理等。

深探地学建模软件，可采用多源数据建立任意复杂的高精度三维地质模型，并提供丰富的属性插值算法，同时支持基于所建模型的数值模型与动态更新。深探地学建模软件含有以下主要模块：构造解释模块、构造建模模块、网格化模块、属性建模模块、地应力模拟计算模块和三维构造演化模块。

大工区整体建模平台，支持建立任意范围、任意精度的整体三维地质模型。建模范围与模型精度是一个矛盾体，当建模范围很大时，模型精度则受到了限制，反之亦然。该产品有效的解决了这一问题，可建立高精度的盆地模型、整个城市的模型等，并提供了大规模数据管理、多人并行建模、模型无缝拼接、模型局部更新等功能。

透明地球系统，是一个大规模三维地质模型在线可视化共享平台，不仅支持海量三维地质模型数据的安全存储与快速调用，而且使用户在不安装任何插件的情况下就可以通过浏览器在线浏览、使用地质模型，在地质模型可视化方面取得了技术突破，推动了地质模型的统一管理 with 共享。

可视化与应用



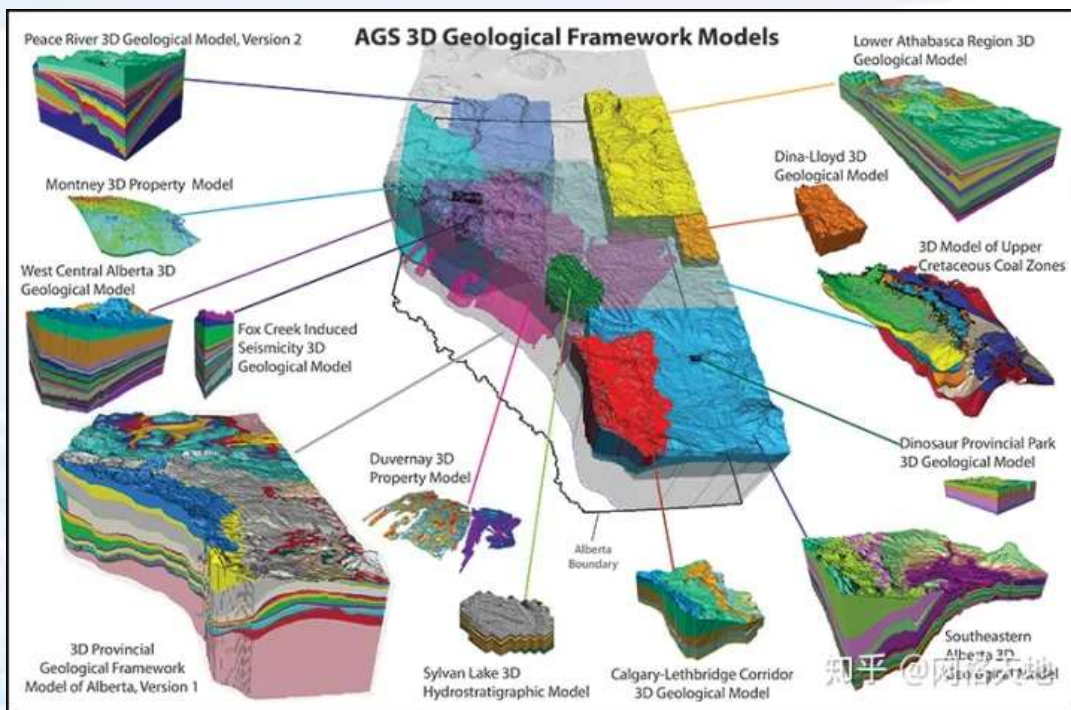
申请免费试用

<http://www.gridworld.com.cn/Software.aspx?id=15>



阿尔伯塔地质调查局三维地质建模项目

2010年，阿尔伯塔地质调查局启动了三维地质框架建模项目，建立整个省的三维地质模型。现在，三维地质模型的覆盖面积已经达到**602,825 km²**（见图1），包括省级地质模型和不同精度的局部地质模型。本文以《阿尔伯塔地质调查局三维地质建模项目》为基础，将分享阿尔伯塔地质调查局的建模方式，建模过程中的问题和解决方案，以及现在在建模过程中仍未解决的问题，并针对其中的问题给出解决办法。





阿尔伯塔地质调查局三维地质建模项目

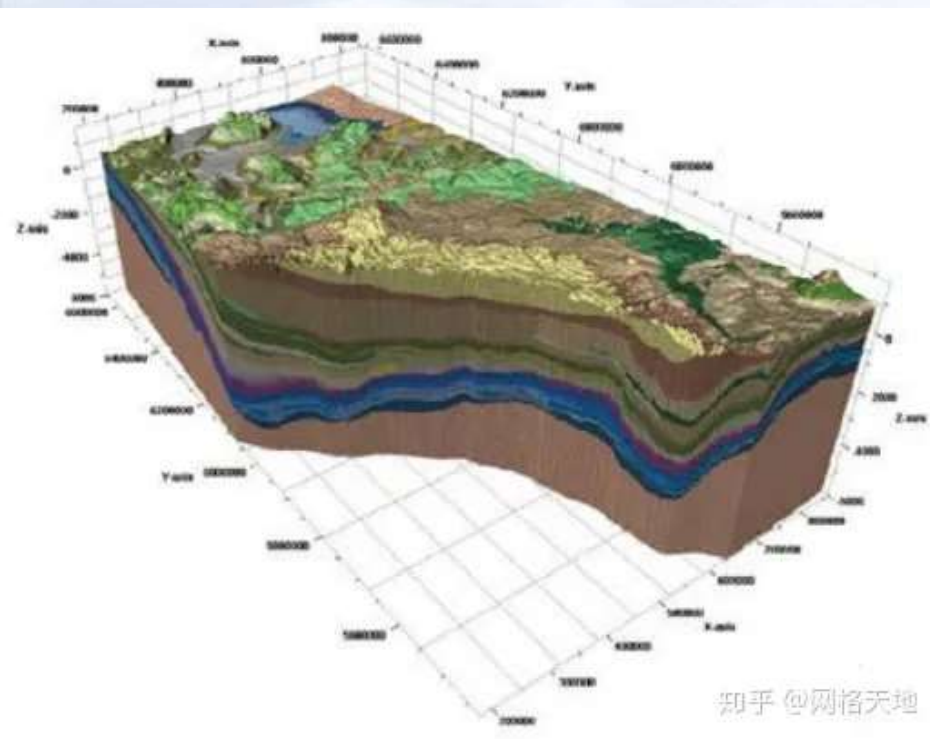


图2 阿尔伯塔三维地质框架模型

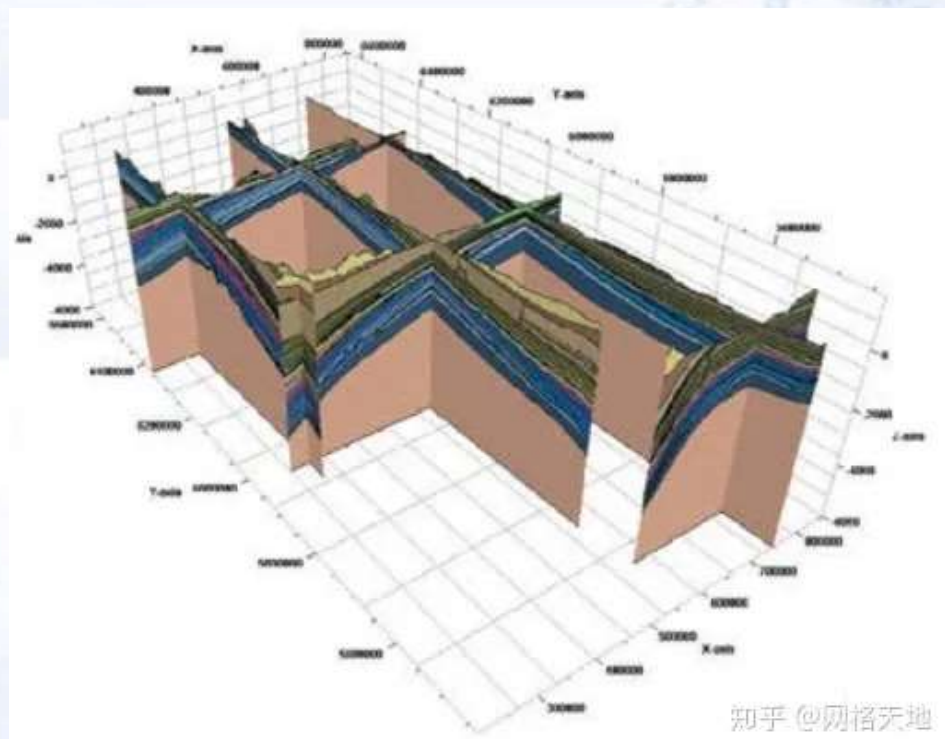


图3 阿尔伯塔三维地质框架模型



建模方式

1. 隐式建模与显式建模：最初采用隐式地质统计学算法建立地层，现在根据数据量和地层的复杂程度，使用各种不同的算法，致力于建立可以尽可能表达真实地质情况的三维地质模型。

2. 从2.5维网格转向3维网格：最初建立的地质模型只是描述了每个地质单元的顶层与底层，生成的网格为2.5维，网格与相邻地质单元不一致，尤其是在描述不整合面、断层和形变时，或是建立礁石和其它在短距离内变化剧烈的地质单元模型时。需要对这些网格做额外的修改才能使地层（网格）相匹配，与地质数据一致。因此，需要通过定义每个地层之间的关系（如整合的、侵蚀的等），将这些地层结合，建立三维地质模型。这个过程是非常耗时的。



建模方式

3. 从建相互独立的地质模型转向为整个省建立一个多尺度的地质模型：当数据更新时，建模团队需要建立并更新关于本省的许多的三维地质模型。对于省级模型与局部模型并存的地区，这一过程会涉及很多重复性工作和矛盾的地方。为了避免这一问题，提高工作效率，阿尔伯塔地质调查局开始把所有地质模型合并成一个覆盖整个省的多尺度地质模型。

4. 建立更多三维属性模型：对于需要进行资源调查的地质单元（如地下水、油气或锂），使用各种地质统计学算法建立相应的三维属性模型。使用的算法从简单克里金到模拟算法，如：高斯随机函数模拟。

5. 使用机器学习和深度学习提高建模结果：阿尔伯塔地质调查局已经成功使用机器学习技术来预测整个省的滑坡敏感度，以及评估地质参数与地震敏感度的关系。此外，还用机器学习的方法利用多源数据完善了整个省的基岩地形。



现存问题

阿尔伯塔地质调查局最近做了一些组织结构上的调整，来满足三维建模需求的增长，如将建模者集中到一个团队。但是，现在仍面临着很多挑战，主要是与硬件、软件、数据、建模人员的数量和阿尔伯塔地质情况的复杂性相关。

1.模型精度与模型尺度的矛盾：对于战略要地和数据充足的地方，阿尔伯塔地质调查局建立了高精度地质模型，将这些模型与省级模型进行整合时，往往面临电脑计算能力不足的问题。现在使用的电脑最低配置如下：Intel Xeon 8-12核心2.9 GHz时钟速度处理器、64GB RAM和Invidia Quadro K5000 (4GB) GPU。预期的解决方案是提高电脑的RAM和GPUs，并且正在评估在云环境下建模的方式。

网格天地的解决方法：使用网格天地自主研发的无缝拼接技术，可以有效的解决模型精度与尺度的矛盾，建立大规模高精度的省级三维地质模型。通过无缝拼接技术，可将相邻的两个模型拼成一个内部没有缝隙的整体模型，而且向外可以无限延展，在内支持任意局部的下载使用与局部更新，从而可以减少大量的重复性工作，提高模型使用的时效性（见图7该模型的网格精度为20m*20m，面积约为2500km²）。



现存问题

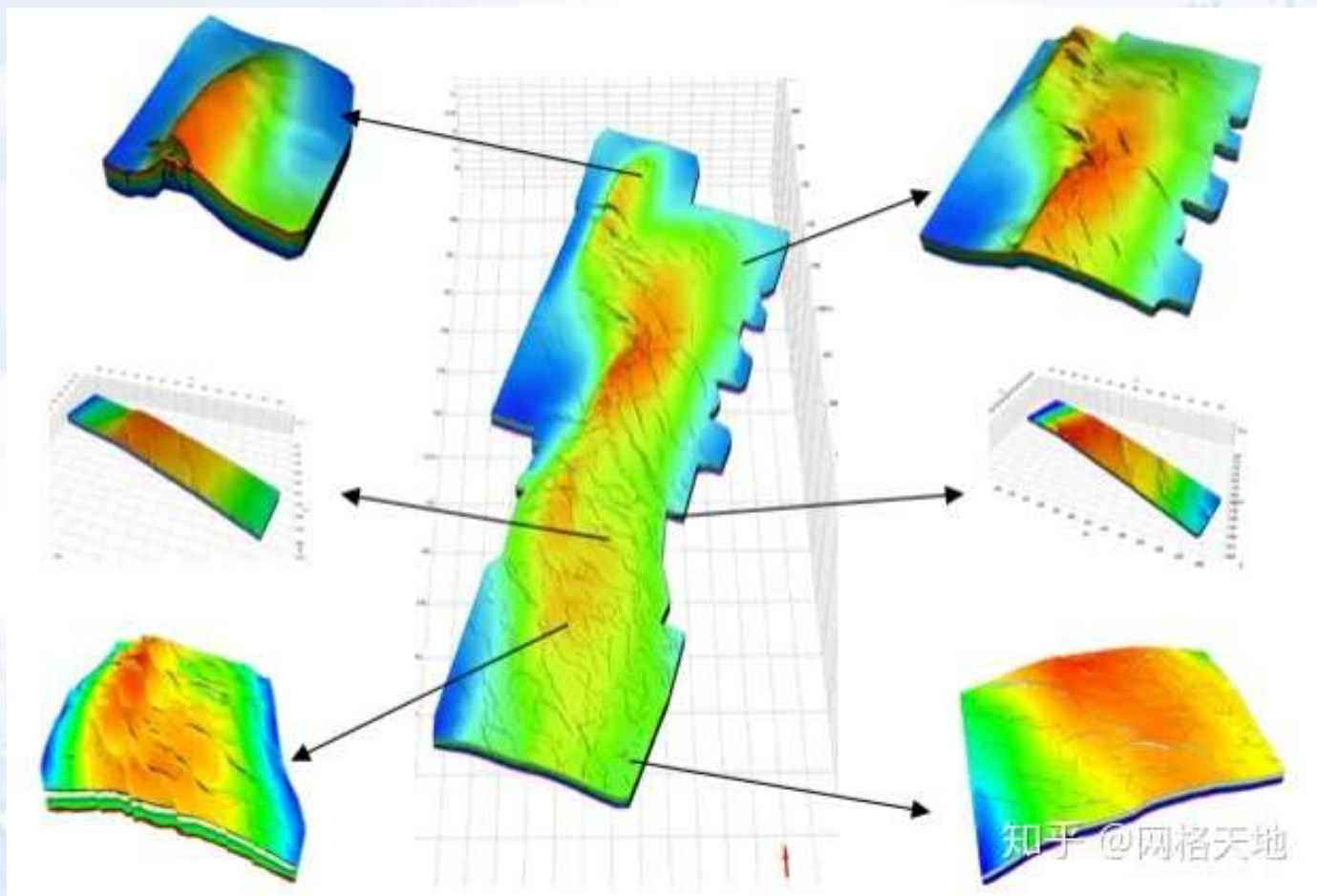


图7 通过无缝拼接建立的整体三维地质模型



现存问题

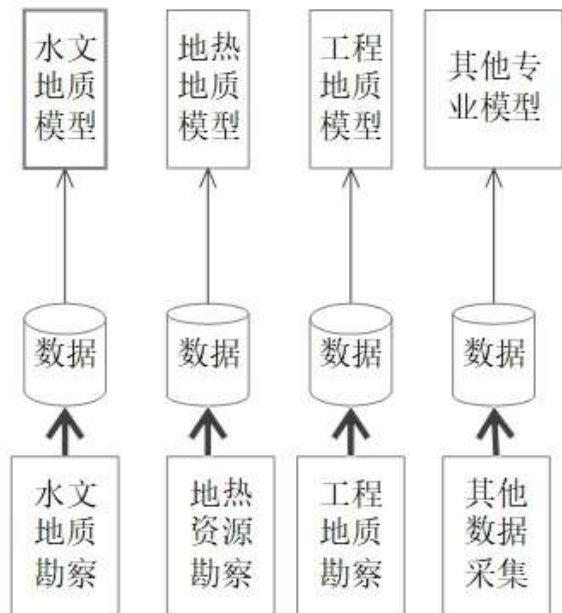
2. 软件的互操作性限制了所建模型被大范围使用：所建模型无法便捷地、无损地导入其他软件系统，所以扩大模型使用范围变得非常困难。**预期解决方案**是提高不同软件的互操作性和基于浏览器使用三维地质模型的可能性。

3. 数据存储零散，整合数据后又需要满足不同部门的不同需求：同样的数据被存储于同一机构各种地方的数据库，阿尔伯塔地质调查局正在努力使AER、AGS、阿尔伯塔政府和阿尔伯特市民可以通过一个数据库就可以使用到最新的、经过评估的数据。这不仅需要对于原始数据进行整合，而且还要满足不同决策者的各种需求。**预期解决方案**是建立多尺度、多精度模型。根据决策者的需求和数据分布情况，建立不同精度的模型。

网格天地的解决方法：建立基础三维地质模型，并基于此模型生成各种专业模型，满足不同决策者的需求。使城市地质调查工作从传统的单一型工作模式（见图13）转向共享共建的工作模型（见图14），不仅促进了地质资料的统一管理、提高了三维地质模型的精度，而且减少了大量重复性的工作。

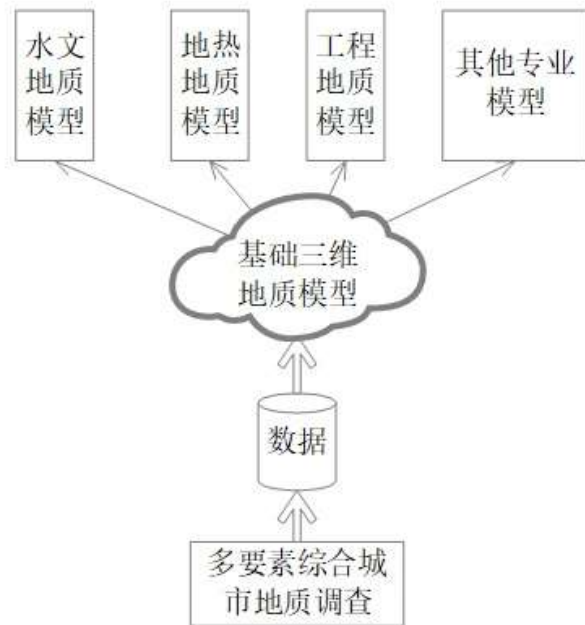


现存问题



传统的城市地质建模工作模式

知乎 @网络天地



新兴的城市地质建模工作模式

知乎 @网络天地

图13 传统的城市地质建模工作模式

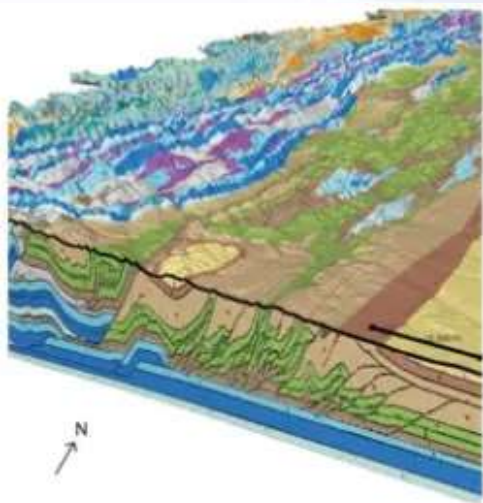
图14 新兴的城市地质建模工作模式



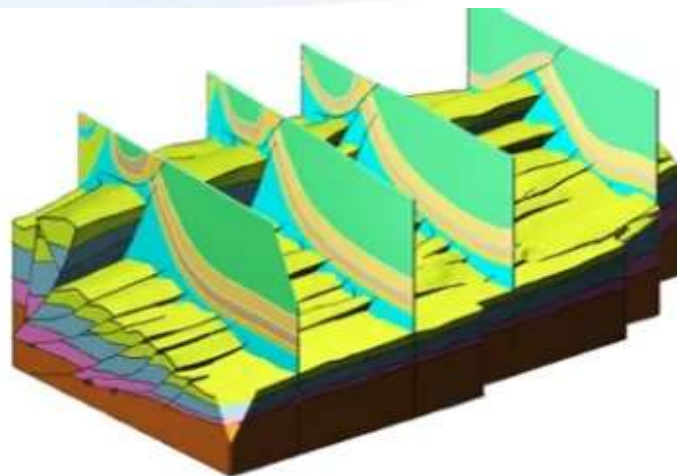
现存问题

4. 另外一个巨大的挑战是对于阿尔伯塔西部（落基山脉）的高度形变、断裂区域建模（见图15）：该区域的覆盖面积大约为78,000 km²。目前，建模团队正在根据该地区的数据情况评估最合适的建模方式。

网格天地的解决方法：用深探地学建模软件可建立任意复杂三维地质模型，图15（左）为阿尔伯塔落基山脉的剖面，图15（右）为用深探地学建模软件建的三维地质模型。



阿尔伯塔落基山脉剖面



用深探地学建模软件建的三维地质模型 © 网格天地