

Overview and Model Evaluation of 3D Geological Modeling Technology in the Oil and Gas Field

Zeren Zhang^{1,2} Haisheng Yu^{1,2} Wentao Wang^{1,2} Guibin Dong¹ Yiwei Ge^{1,2}

1. Bureau of Geophysical Prospecting INC., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou, Hebei, 072750, China

2. National Engineering Research Center of Oil & Gas Exploration Computer Software, Zhuozhou, Hebei, 072751, China

Abstract

With the continuous deepening of exploration and development of oil and gas fields, 3D geological modeling has gradually become the focus of reservoir geological research. Reasonable and accurate 3D geological models have become the important foundation for solidifying reservoir numerical simulation and oilfield development plans. As a key hub connecting exploration and development, 3D geological modeling technology is a vital step of integrated evaluation and development technology. This paper explores the significant role of 3D geological modeling technology in the oil and gas field, discusses the core technical methods, elements and geological rules that need to be followed during modeling process, and summarizes 5 critical assessment criteria and methods for reviewing models, providing effective means for the quality control of 3D geological models.

Keywords

3D geological modeling, geological model, model evaluation

油气领域三维地质建模技术概述与模型评估

张泽人^{1,2} 于海生^{1,2} 王文涛^{1,2} 董贵斌¹ 戈一伟^{1,2}

1. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 中国·河北 涿州 072750

2. 油气勘探计算机软件国家工程研究中心, 中国·河北 涿州 072750

摘要

随着油气田的勘探开发不断深入, 三维地质建模逐渐成为了油藏地质研究的重点, 合理准确的三维地质模型是做好数值模拟和油田开发方案的重要基础; 作为连接勘探与开发的关键枢纽, 三维地质建模技术是油气藏评价开发一体化技术中的重要组成。本文探讨了三维地质建模技术在油气领域中的重要作用, 并论述了三维地质建模的核心技术方法、要素及需要遵循的地质规则, 并总结了三维地质模型的5项重要评估标准及评估方法, 为三维地质模型的质量控制提供了有效手段。

关键词

三维地质建模 地质模型 模型评估

1 引言

近年来, 计算机技术的迅猛发展极大地推动了油气勘探领域的进步, 其中, 三维地质建模技术成为一大亮点。这一技术通过高精度的计算机模拟, 能够真实地反应地下构造, 同时可以建立包括相、储层模型及油藏模型, 计算油气储量, 还原地下情况, 从而使研究人员能够更加精确地了解油气资源的分布。三维地质建模技术能够对储层的空间构造、展布、厚度等关键特征进行精确描述, 帮助研究人员深入理解储层特性和构造特征, 并为后续油藏数值模拟开发方案的制定提供了有力的支持。

2 三维地质建模技术

传统的地质构造研究多依赖于二维剖面图和地质图, 这些方法在描述地质体的空间特征方面存在明显不足, 尤其是在面对断层、褶皱、岩浆侵入体等复杂地质结构时, 二维地质图往往无法提供准确的三维空间关系, 限制了对地质构造的精细刻画。

三维地质建模(3D Geological Modeling)概念是由 Houlding 于 1994 年最早提出, 是指在三维空间中融合实体分析、空间分析与预测、地质解译、地质统计学、空间信息管理及图形可视化等技术, 以用于地质分析及模拟应用的技术^[1]。初期主要依赖简单几何体(如立方体、球体)的拼接, 模型精度较低; 随着随机模拟算法(如克里金插值)与多源数据融合技术的引入, 模型逐渐从静态向动态演化, 精度也随之提升; 现今结合了人工智能(AI)、云计算与虚拟现实(VR), 可实现自动化建模与实时动态更新。

【作者简介】张泽人(1990-), 男, 中国河北涿州人, 硕士, 工程师, 从事三维地质建模的软件开发与研究。

三维地质建模技术在油气勘查与开发过程中发挥着至关重要的作用。通过对油气资源的空间分布、成藏规律、构造特征等多方面的综合研究,能够为油气资源开发提供科学可靠的依据。通过三维地质模型的建立,不仅可以直观展示油气藏的空间构造,还能精确描述储层展布、计算油气储量等关键研究内容,从而为油气田开发方案的制定提供量化参考(图1)。通过三维地质建模及分析可显著降低开采浪费,提高采收率和经济效益,据统计,应用三维地质建模技术优化开采方案的油气资源的利用率提升可达到20%以上。与此同时,三维地质建模可有效减少因传统二维地质图件或勘探数据的不足所带来的不确定性。

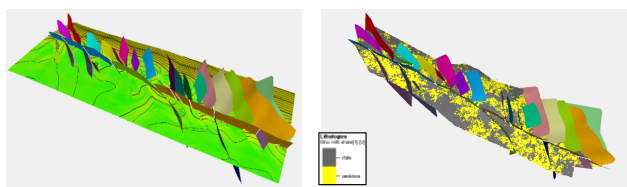


图1 三维地质模型效果图

(左:构造模型;右:网格属性模型(岩相))

对于目前行业内的建模工具来说,自二十世纪八十年代以来,西方国家如英国、美国、法国、加拿大和澳大利亚陆续发布了多种建模软件,其中广为人知的有Petrel、RMS、FastTracker、GOCAD、和EarthVision等。这些软件在地震勘探、油气田开发以及开采评价和油气田生产管理等方面都得到了广泛应用。

2.1 三维地质建模的核心技术方法

(1) 数据驱动建模

数据采集与处理:包括钻孔数据、地球物理勘探(如地震波、雷达探测)、遥感影像等多源数据的获取与标准化处理。

多源数据融合:通过算法(如贝叶斯网络、深度学习)整合不同尺度和精度的数据,提升模型准确性。例如结合大量沉积相及岩相类型和模式生成不同地区不同年代的属性模型,可提升相建模及属性建模的精度和合理性。

(2) 模型构建技术

基于几何的建模:包括表面建模(如三角剖分法)与体建模(如规则网格划分)。例如,利用轮廓线对应算法来处理地质剖面中的剥蚀或尖灭现象,可以构建复杂岩体的构造模型。

基于地质认知的建模:融入地质规律(如地层连续性、断层分布规律),例如结合构造解释与参数反演技术,构建反映实际地质环境的动态模型。

(3) 智能化建模技术

随着科技的快速发展,机器学习和人工智能技术逐渐应用于地质学领域。机器学习和人工智能通过提供高度自动化的数据处理和分析功能,可有效地处理各种海量的地质数

据。通过对这些数据的学习和分析可以识别出地质构造的模式和油气分布的规律,从而为三维地质建模提供更准确的框架基础和建模思路。

(4) 光栅建模技术

光栅建模技术是一种基于三维光栅数据的地质建模方法,广泛应用于地质勘查、油气资源评价等领域。该技术通过获取地质体的空间分布数据,利用计算机图形学模拟构建三维地质模型,便于分析和研究地质构造、油气储层展布等^[1]。

(5) 数值模拟与可视化技术

在三维地质建模过程中,数值模拟与可视化技术发挥着至关重要的作用,可以为地质学家和油藏工程师提供了更加直观、深入的了解地下构造、储集流体流动及开采优化方式,从而有效地指导油气勘探、油藏开发及方案制定。

(6) 聚类分析与统计分析技术

在三维地质建模过程中,聚类分析与统计分析是重要的技术手段,这些技术可以帮助研究人员对储层的构造特征、地层及岩相特征等进行分类和描述,从而为建模提供更为准确的依据及数据。

2.2 三维地质建模的要素

Cares于2011年提出三维地质建模的三要素(必要组成)为几何、拓扑和属性^[2]。

(1) 几何要素:通常涉地质要素及其空间位置和几何形态的描述。地质对象的空间分布和形态特征往往通过不同的几何图形来呈现,如点、线、面和体。在地质学中,点通常用于表示具体的地质现象或样本位置;线常用于表示地质结构的线性特征;面则用于描述地质层面或界面的分布;而体则用于描述具有三维空间特征的地质对象。

(2) 拓扑要素:拓扑学主要研究几何图形在连续变形(拓扑变换)的过程中保持不变的特性^[1]。直线上的点和线的顺序关系、结合关系,以及曲线和曲面的闭合性质都是典型的拓扑特征,Mallet于2008年将拓扑分为宏观拓扑和微观拓扑两类,这两种拓扑方法相辅相成,共同推动地质科学在空间分析和模型构建中的应用,增强了研究人员对构造的认识^[4]。

(3) 属性要素:属性包括多种不同的物性特征,既包括几何特征,如地层或断层的曲率、产状等,也包括储层物性,如岩性、孔隙度、渗透率、净毛比等,还可以指地下构造条件下的可变属性,比如地层及流体压力、地下温度等,综合考虑多种类型的属性,可以全面描述地质体的特征,为建立精确的模型打下基础,为勘探与开发提供依据^[5]。

2.3 三维地质建模的地质规则

通常研究人员使用非流形来表达地下地质构造的边界模型(流形指目标局部呈现出欧几里得空间特性的空间,若某点的局部拓扑维数不定则为非流形实体)。Cares于2011年提出由于建模算法多基于流形实体,因此在建模过程中需通过一定规则来确保模型符合真实的地质特征。

(1) 地质界面的可定侧性：地质界面具有明确的两面，如断层的上下盘之间的面或地层中不同岩性的分界面。

(2) 地质界面的不自相交性：是指不同的地质体可以相互分割交切，而不与自身相交的特性。根据地质界面的判定及划分规则来说，从逻辑上不自交，否则即为判定及划分有误。

(3) 地质界面接触关系的有效性：地质界面之间的接触关系主要包括地层与地层、断层与断层以及地层与断层之间的接触^[1]。Caumon于2009年提出，依据拓扑原理，边界表达模型中的表面只能在共同边界相交。因此，除非一个表面被另一个切断，否则任何两个表面都不应相交^[1]。

(4) 三维构造模型的一致性：三维构造模型的一致性主要体现在地质界面之间的相互接触状态下，几何拓扑的一致性^[1]，即为处于接触关系的两个界面在接触位置需共享相同的顶点和边，这为后续的网格剖分、网格体积计算等数值计算提供了基础条件。

(5) 地质约束的有效性：构造建模的核心在于将实际地下地质特征以模型方式表征，即通过将地质数据转化为约束条件来限制模型的构建。例如，建立的层位模型必须符合层位解释数据分布规律等。

3 三维地质模型的评估

通过建模生成的三维地质模型，需要对其有效性和准确性进行评估，以确保模型的精度和稳定性，主要分为5个方面的评估标准和方法。

3.1 模型的准确性

评估建模方法的首要标准是模型的准确性。只有在准确性和稳定性都得到验证的情况下，建模方法才能被认为是可靠的，才适合于复杂的地质环境中（例如复杂断裂构造下）的实际应用。

数据匹配度：模型结果与地震解释数据（断层、层位）的吻合程度，检查输入数据点是否落在模型面上，查看统计结果。

地质合理性：模型反映真实构造地质的规律，与实际情况匹配，如地层连续性、断层几何关系、岩性分布等。

不确定性分析：通过直方图检验需呈正态分布。

3.2 模型的鲁棒性

鲁棒性是指模型在面对数据噪声、异常值或参数扰动等不确定因素时，仍能保持稳定高效的性质。通过测试模型在不同扰动条件下的表现，可以有效判断其在实际应用中的稳定性和准确性，尤其是在复杂和动态变化的情况下。

抗噪能力：在输入数据中引入采样点异常值参与计算，依旧能够稳定输出模型。

缺失数据容忍度：在数据稀疏或分布不均区域，模型能够通过插值、外推生成合理的构造模型，避免了地层突变或不连续。

3.3 模型的解释性

解释性指的是模型能够提供清晰且易于理解的说明与展示，从而帮助研究人员理解模型的构建及应用。提高模型的解释性不仅有助于增强研究人员对模型的理解和认知，也为进一步优化和调整模型提供了重要的依据。

地质意义明确性：模型参数和输出均具有明确的物理或地质学含义，而非纯数学抽象。

可视化清晰度：三维可视化能够直观展示地层、断层、储层等关键模型要素。

逻辑可追溯性：建模流程可分解（数据加载与处理→构造建模→属性建模），便于回溯错误来源及参数调整。

3.4 模型的计算效率

计算效率指的是模型在面对大规模数据或执行复杂计算时的性能表现，具体表现为在较短时间内完成计算的能力，往往受到计算机硬件，网格数量等条件的约束。合理的模型既能保证精度，又能兼顾运算效率，以满足实际应用中的需求。

3.5 模型的可扩展性和灵活性

可扩展性是指模型在面对不断增加的数据量时，依然能够保持高效和稳定的性能表现；灵活性则指的是模型能够适应多变的应用场景和需求变化。

多尺度适应性：模型支持局部的精细建模，例如针对某个井周围的网格加密，可与全区整体建模无缝切换。

多源数据融合：同时兼容了地球物理、地质、岩石物理、油藏工程等多种数据输入，并可实时加入或更新数据。

4 结论

三维地质建模技术是油气藏评价开发一体化中的关键技术之一，是油气藏地质研究的重点。高精度的三维地质模型为油气藏数值模拟及油气田开发方案的制定提供了重要基础，在生产中是连接油气勘探与开发的重要一环；而对于构建的三维地质模型需要进行详细的评估以确保其可靠性，需要从多个维度进行全面考量。在实际评估过程中应选择合适的评价方法和指标体系，并可根据具体情况特征和需求进行调整。

参考文献

- [1] 李兆亮, 潘懋, 韩大匡, 等. 三维构造建模技术[J]. 地球科学, 2016, 41(12):2136-2146.
- [2] 李兵, 陈海龙, 王娟. 跨尺度三维地质建模的数据集成方法[J]. 中国地质, 2019, 46(4):1358-1367.
- [3] 黄小明, 陈海蓝, 张伟. 复杂褶皱区域三维地层建模方法[J]. 地质学报, 2020, 94(3):842-851.
- [4] 覃新洲, 刘波, 王平. 复杂断裂带不确定性建模分析[J]. 计算机科学, 2020, 47(6):126-132.
- [5] 刘晓东, 杨卫东, 陈小林. 复杂断裂构造约束下的三维地质建模方法[J]. 地质通报, 2019, 38(12):1772-1779.