

储层三维地质建模质量控制的 关键点

崇仁杰^{1,2}, 于兴河¹

(1 中国地质大学, 北京 100083; 2 英国石油公司(BP) 中国勘探及生产公司, 北京 100026)

摘 要: 总结了三维地质建模质量控制的关键点, 针对常见的问题提出了改善模型质量的具体方法。模型质量控制主要包括 2 个方面: 构造模型和属性模型的质量控制。构造建模质量控制目的是建立符合地质规律的断层模型, 正确反映地层间的接触关系, 减少异常网格。属性模型质量控制的主要关键点包括: 模型与井点数据保持一致; 选择合理的变差函数参数; 模型的砂地比分布合理, 模型与井点数据的统计直方图一致。此外, 流线模拟和历史拟合等动态方法可以进一步验证模型是否合理反映储层非均质性。上述模型质量控制方法在多个油气田的储层建模中得到应用, 并取得了较好的效果。

关键词: 油气田勘探开发; 油藏描述; 储层三维地质建模; 模型质量控制

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A

三维地质建模是目前油气田勘探开发生产各阶段地质油藏研究工作的一项重要内容。三维地质建模技术经历了 20 多年的发展历程, 在油气田开发、生产项目中得到了广泛的应用, 成为油气田总体开发、中后期调整方案的重要技术支撑^[1,2]。但是, 由于油气田地下地质特征的复杂性以及基础资料的不同, 目前还没有建立统一的模型质量控制标准。根据多年的地质建模应用经验, 认为地质建模的关键点包括构造建模和属性建模 2 大方面。在模型质量控制上, 应依据建模的流程, 每一步都要进行质量控制, 以保证模型结果的合理性。首先, 在井点上, 模型数据(构造、属性)应该与井点输入数据一致; 其次, 在三维空间上, 断层性质、断层组合形式、构造特征、地层间的接触关系、沉积微相的空间展布特征、地质体的空间叠加关系、砂地比、属性数据的统计直方图等要符合油田的地质特征。

1 构造模型质量控制

构造框架模型^[3] 确定了储层地质模型的空间位置、地层间的接触关系、模型网格单元的空间排列以及模型的毛体积, 是属性模型的载体, 因此, 建立合理的构造模型是三维地质建模工作的基础。质量控制的主要目的是: 模型与井点分层吻合、断层的性质和空间组合关系合理、地层间的接触关系符合地质规律等。下面就这 3 个方面作进一步阐述。

1.1 井点分层数据的控制

构造模型的建立是以井点数据作为控制数据, 所以, 构造模型与井点分层数据是否一致是构造模型质量控制首要考虑的问题。目前的建模工具软件都提供井点数据校正功能, 只要按照正常的工作流程建立构造模型, 在井点上基本没有误差。通常, 在完成三维构造模型后, 将模型中对应井点位置上的层面数据提取出来与已知分层数据

收稿日期: 2010-11-24

作者简介: 崇仁杰(1968—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气田勘探开发研究工作。E-mail: chongrj@126.com

进行对比, 构造模型与井点数据的质量控制就一目了然了。

1.2 合理的断层模型

断层模型不仅决定着油气田区块的划分, 而且影响地下流体流动边界的分布。断层模型质量控制的基本原则是: 断层的空间展布和组合关系合理, 既要符合区域构造及局部构造特征, 又要使模型的异常网格数最少。主要的质量控制内容包括 3 个方面: ①在地质建模之前, 要研究油气田区域构造地质规律和局部构造特征, 这是正确建立地质模型的基本前提。②断层数据的来源多种多样, 有断层平面图、地震剖面上解释的断层线、井点钻遇的断点数据等。一般情况下, 由于解释人员观点的差别、数据来源和精度的不同等原因, 会造成这些数据在三维空间交叉的地方并不能完全吻合, 这就要求地质建模人员对多种数据进行综合, 得出在三维空间协调一致的解决方案。③断层模型直接影响三维网格化的结果。三维建模技术发展的初期阶段, 模型的最小单元是矩形网格, 这种网格划分方式简单, 网格节点是正交的。在数值模拟运算中, 不会因为网格形态的异常而造成数值模拟运算的不收敛, 其缺点是不能逼真地描述复杂断面的空间形态。近年来, 广泛应用的角点网格化技术可以更加精确、形象地描述包括正断层、逆断层、Y 形断层等的空间形态, 使得模型在视觉上更加逼真。在通常情况下, 由于断层与层面的复杂关系以及断层组合的多样性, 在断面或者断层间相交位置附近可能产生异常形态网格和负体积网格。为了消除或减少异常形态网格, 可以在保持油气田总体地质特征的基础上, 对

复杂的断裂系统进行必要的简化。但是, 理论上对于“Y”字形断层, 角点网格划分技术不可能完全消除异常网格, 因此, 在为油藏模拟提供模型输入的时候, 可以通过网格粗化或进一步简化断层模型, 尽量减少异常网格的数量。

1.3 地层接触关系符合地质规律

常见的地层接触关系有平行接触、削蚀、尖灭、顶超、底超等, 层面框架模型要正确反映地层间的空间接触关系。建模工作前, 通过研究项目的构造地质特征, 明晰地层间的接触关系。在操作中, 要根据实际地质特征定义好地层的接触关系; 构造模型完成后, 可以采用图形可视化的手段进行质量控制, 从不同角度对模型的剖面及平面逐一检查, 确保地层的接触关系正确。在构造建模中, 通常会根据需要内插、外推一些层面。根据不同趋势面产生的层面在某些位置会产生层面相交, 从而造成地层的缺失、减薄、增厚。对此, 可以通过厚度约束等方法进行校正, 以保证每个地层的厚度变化在平面上是合理的。图 1 所示的实例中, 地层间在油藏主体部位是平行接触, 上倾方向经历后期剥蚀与上覆地层不整合接触, 而下部的 2 个层位则超覆于基底之上, 主体油藏之上的 2 个透镜体向四周尖灭。该模型较好的反应了地层间的接触关系。

综上所述, 在构造建模期间以及构造模型完成后, 可通过可视化技术, 确保地质模型的断层组合关系合理、地层间接触关系正确、局部构造特征符合区域地质规律, 同时, 通过计算模型异常网格和负体积网格来检查模型的异常网格数量。

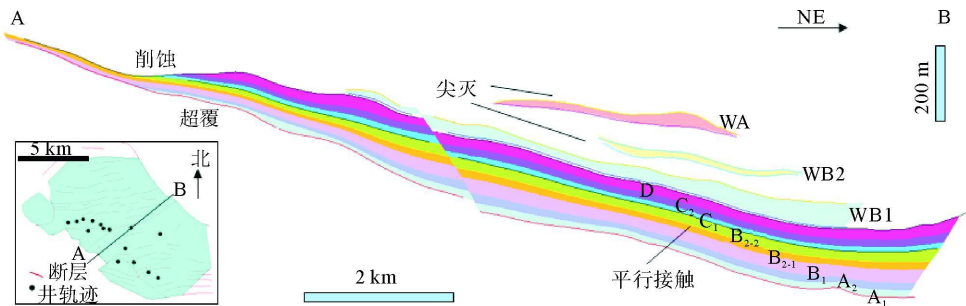


图 1 某油田三维构造模型剖面

Fig. 1 The cross section of a 3D structure model (data from an offshore field)

2 储层属性模型质量控制

储层属性模型^[1,45]包括离散属性模型(例如沉积微相模型和岩性模型)和连续属性模型(孔隙度、渗透率、饱和度模型等)。质量控制的宗旨就是合理表征沉积微相和储层物性的三维空间分布,建立一个符合油田非均质性的储层模型。模型的质量控制主要包括:井点上与井数据保持一致、空间上符合沉积地质规律、模型属性的统计特征合理。

2.1 与井点输入数据的一致性

由于井数据是地质建模的“硬数据(Hard data)”,所以模型在井点上一定要与井数据一致。井上的原始属性数据是连续样点的曲线形式,而三维模型的网格厚度比样点间距大。属性建模前,要选择合适的平均方法,把对应网格的连续样点进行平均,得到一系列平均值作为属性建模的控制点。通过确定性算法或者条件模拟建立的属性模型,在井点处的模型值与前面提到的控制点是一致的。为了建立一个可靠的模型,关键的问题就是选择合适的平均方法。例如,由于渗透率受储层非均质性和流体的流动条件影响,所以渗透率的平均比较复杂。Acher^[6]认为,当储层的单层厚大于 3 m,平面连续性好,且流体在地层

中单相水平流动,可以选择算术平均法;当储层由一系列 1.5~3 m 厚的单砂体叠合连片,具有“砂包泥”的特征,且流体在地层中单相流动,选择几何平均法比较合理;当储层为 0.3~1.5 m 的孤立小砂体,空间上呈现“泥包砂”的特征,并且地层流体在地层中单相垂直流动,可选择调和平均法。其他属性的平均方法相对简单,一般都采用算术平均。

模型在井点上与井数据的一致性为储层属性建模的基础。选择合适的平均方法,并且在计算变差函数之前要对比平均后的属性与原始属性值,以确保建模的控制数据是原始属性的合理表征。

2.2 符合沉积学规律

综合地质研究在储层建模技术中发挥着核心作用^[7],建模不仅是数学问题,更是解决油气田的地质问题。模型属性的空间分布特征与地质模式的一致性,主要包括沉积微相的几何形状、空间配置关系、体积百分比等,这些特征是由沉积环境决定的。地质建模技术主要通过 4 种手段来引入地质概念的约束:沉积微相平面图、变差函数、基于目标的模拟方法和多点地质统计学方法(表 1)。其中传统地质统计学的变差函数得到了广泛的认可和应用。下面以该方法为例,讨论怎样利用地质概念模式来约束储层三维地质建模。

表 1 地质概念指导储层属性模拟常用方法

Table 1 Summary of the methods for reservoir properties modeling and concerned geological conceptions			
方法	方法描述	优点	缺点
沉积微相平面图	利用手工绘制的二维沉积微相平面图约束沉积微相模型或其他属性的空间分布	能够较好地综合地质概念模式应用广泛	不易实现不同地质时期沉积环境的变迁
变差函数 (variogram)	通过井数据或地震数据计算变差函数,并使用变差函数椭球体模型拟和得到地质体的几何参数。采用克里金或条件模拟方法模拟储层属性的空间分布	计算机自动模拟储层非均质性技术成熟,应用最广泛用于连续变量和离散变量	要求井数据多且空间分布均匀难以描述几何形态复杂的地质体
基于目标的模拟算法 ⁵¹ (object based simulation)	通过地质研究类比,确定模拟目标(弯曲带状、椭圆、扇形等)的空间几何参数,模拟过程中可直接产生目标体	应用广泛模拟河道等形态复杂的地质体仅适用离散变量	视觉上,模拟结果过于理想化非条件模拟,不一定与井点数据吻合
多点地质统计学 ⁸¹ (multiple-point geostatistics)	手工绘制的二维沉积模式图(或者地震属性平面图)作为培训图像,通过多点统计技术自动提取地质概念模型(具有复杂的几何形态和结构),将其应用到属性模型的模拟过程中	理论上,是地质概念与地质统计学结合最完美的建模技术连续变量和离散变量都可	商业化程度不高,目前仍没有得到广泛应用

砂体几何形态是判断沉积环境的重要标志之一,这是因为砂体的形态、大小和分布是其形成环境与沉积作用的反映,与沉积环境有着直接的关系^[9]。地质建模技术通过变差函数来控制砂体的几何形态、大小、分布,因此,变差函数参数选择是否合理是模型的重要质量控制指标之一。对于勘探开发早期和海上油气田,井数据通常较少,利用平面上稀疏分布的井数据无法合理估计全方位的变差函数参数,而在垂向上,由于井点数据较密集,可以得到较为准确的变差函数。对于平面的变差函数,如果三维地震资料的品质较好,就可以利用地震数据计算,否则,可以采用类比法选取,例如,露头研究、现代沉积调查和水槽试验等通常可以给出砂体的长宽比和宽厚比,据此可以估算变差函数在平面上的主变程和次变程。这只是变异函数参数的初始值,选择是否合理还需要模型砂地比的验证。

砂地比是模型中所有砂岩与地层的体积比,是和沉积微相以及有效厚度下限(cutoff)密切相关的参数。它影响模型的有效体积以及储层的空间非均质性。砂地比大,模型的有效体积大,空间上砂体连通状况好,非均质性小。反之,砂地比小,模型的有效体积小,空间上砂体连通状况差,非均质性大。在建模应用中,如果井数据足够多,那么井点数据统计的砂地比就可以代表该地区的砂地比。可以通过对比模型与井点统计的砂地比,进行模型质量控制。表 2 给出的实例中,对应每个层位,井点上统计的砂地比与模型统计的砂地比具有很好的一致性。当两者差别较大时,说明变差函数选择不合理。可以通过微调变差函数参数,以达到模型与井点砂地比的一致性。如果不调整变差函数参数,而通过强行过高、过低设置目标模拟砂地比,也可以达到两者吻合的目的,但它违背了地质建模的基本原则,在实际应用中要杜绝这类手段。

正确的变差函数和合理的砂地比是地质概念在储层模型中的集中体现,因此,它们是储层属性模型质量控制的核心。同时,两者又是相辅相成的,选择了正确的变差函数参数,就会得到合理的模型砂地比,反之,模型具有合理的砂地比说明变差函数参数选择正确。

表 2 模型与井点数据统计砂地比对比
Table 2 Net to gross ratio calculated from 3D model and Well data

层位	井点统计砂地比/%	三维模型砂地比/%
D	91	90
C 2	89	89
C 1	87	85
B2-2	82	81
B2-1	84	83
B1	75	74
A 2	80	82
A 1	92	93

注:数据来源于海上某油田

2.3 模型属性统计特征

在油田开发生产阶段,井数据钻遇了该类沉积相包含的所有沉积微相,那么,井点上统计的孔隙度等属性的平均值和方差以及直方图可以代表该区域的属性特征,建立的模型应该具有相似的统计特征。图 2 是一个孔隙度模型与测井解释孔隙度数据的直方图,两者具有很好的一致性。当发现两者不一致时,一定要找到造成两者不一致的原因。在开发初期,通常井资料少,如果地震数据^[10]分辨率较高,就可以使用地震波阻抗数据作为软约束(soft data)建立孔隙度模型。但是,如果属性标定不合理,并且模拟运算时,给地震数据的权重过高,就可能造成模型与测井数据的统计特征不一致。在这种情况下,可以通过优化标定参数,调整对地震数据约束的置信度,以达到模型数据与测井数据统计特征的一致。

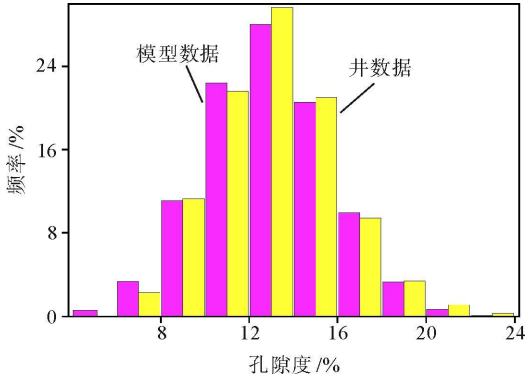


图 2 孔隙度分布直方图
Fig. 2 The histogram showing porosity distribution (data from an offshore field)

直方图的对比是属性模型质量控制的重要内容。当完成了储层的属性模型,应该按照层组、沉积微相对比井点和模型的砂地比与属性统计特征(平均值、方差、直方图)。

3 开发动态数据的验证

前面两部分是关于模型的静态验证,模型的验证也包括动态验证。常用的动态验证方法有 2 种:流线模拟法和历史拟合法。

流线模拟法^[1]无需对模型进行粗化,只需给出流体参数,流线模拟就可以快速根据现有地质模型的非均质性,模拟出注入流体的流动路径。依据油田实际的生产动态数据,可以很快判断模型是否正确。这种方法的优点是,速度快,且无需将模型输入油藏模拟软件中。但是,在油田评价和开发初期,通常没有流体注入数据,其应用受到局限。

历史拟和法^[12]将地质模型进行合理网格粗化(Upscaling),输入到油藏模拟中,利用测试或生产数据进行历史拟合。一个正确的地质模型,其表现的动态特征应该和实际测试数据或生产数据是吻合的。该方法的周期较长,油藏工程师通常需要花费大量时间进行历史拟合。

通过流线模拟和历史拟合法可以进一步验证储层的横向连通状况和非均质性。为了建立一个符合油田实际的模型,在地质建模和油藏模拟过程中,储层地质模型需要不断的调整优化。

4 结语

由于油气田地下地质的复杂性,地质资料本身的不确定性,难以制定统一的质量控制标准。依据建模的流程,从构造建模、属性建模 2 个方面着手,逐步进行质量控制是切实可行的。笔者在 QHD32-6^[13]、BZ25-1^[14]、CFD11-6、平湖^[12]、崖城 13-1 等大型海上油气田的储层三维地质建模中,应用了这种逐步质量控制的方法,并且取得了很好的效果。

构造模型主要从断层和层面 2 方面进行质量控制。在建立断层模型时,通过地质知识和可视化手段,保证断层性质和断层组合的合理性,并且

使模型异常网格数量最少。构造模型是三维地质模型的基础,而合理的断层模型又是构造模型的基础。所以断层模型建立的结果直接影响三维储层模型的成功与否。此外,层面模型要能够正确反映地层间的接触关系。

在属性建模中,正确反映储层的地质特征是属性建模的重要指标。其质量控制的核心内容就是选择正确的变异函数,并且模型应该具有合理的砂地比。只有选择了合理的变差函数参数,建立的模型才能准确反映储层的非均质性。属性模型与井点数据的直方图可以较为直观的反应模型输入输出的一致性,也是属性模型质量控制的必要环节。

总之,模型质量控制的最终目标是建立一个符合构造地质学、层序地层学和储层沉积学规律的模型,模型井点上的属性值和空间上的统计特征应与井数据吻合,同时模型的异常网格数要尽量减少。

参考文献:

- [1] 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 1-7.
- [2] 王家华, 张团峰. 油气储层随机建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [3] 田芳芳, 陈恭洋. 储层地质建模在油藏描述中的应用[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(11): 27-29.
- [4] 吴胜和. 储层建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [5] 吴胜和, 李宇鹏. 储层地质建模的现状与展望[J]. 海相油气地质, 2007, 12(3): 53-60.
- [6] Archer J S, Wall C G. Petroleum engineering: principles and practice[M]. Newcastle: Graham and Trotman, 1986.
- [7] 王家华. 迎接油气储层建模理论、应用的大发展——从 2007 年国际石油地质统计学大会谈起[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 16-25.
- [8] Zhang T F. 在储层建模中利用多点地质统计学整合地质概念模型及其解释[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 26-35.
- [9] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [10] 谢刚. 基于测井约束的储层参数预测[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(9): 30-36.
- [11] Shanif A, MacDonald A C, Kjørholt O, et al. Integrated reservoir characterisation and uncertainty analysis using stochastic methods and streamline simulations[C]. SPE 65178, SPE European Petroleum Conference held in Paris, France, 2000.
- [12] 崇仁杰, 宋春华, 程立芝. 应用随机模拟技术建立夹层模型

[J] . 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 89-91.

[13] 籍 宁, 崇仁杰, 刘 静. 储层预测技术在河流相储层地质建模中的应用[C] //三新三化优秀论文集. 中国石油学会海洋石油学会(三新, 三化)研讨会, 北京, 1999.

[14] 崇仁杰, 刘 静. 以地震反演资料为基础的相控储层建模方法在 BZ25-1 油田的应用[J] . 中国海上油气(地质), 2003, 17(5): 307-311.

THE KEYS TO QUALITY CONTROL OF 3D RESERVOIR MODELING

CHONG Renjie^{1,2}, YU Xinghe¹

(1 China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2 BP (China) Exploration and Production Company, Beijing 100026, China)

Abstract: The paper summarized some key points to the quality control of 3D reservoir modeling. A method was proposed to improve the model quality. The method concerns the control of structural framework model and reservoir property model. The key to structural model quality control involves the building of a right fault model to minimize the abnormal morphology grids and defining of the stratigraphic contacts. The key issues for reservoir property model are to keep consistence between the model outputs and well inputs, choose the appropriate variogram parameters, and distribute the net to gross ratio reasonably in the model. Additionally, the streamline simulation and reasonable history match based on the static model may indicate whether the model can reasonably reflect the reservoir heterogeneity. The model quality control method has been applied successfully in many fields for model building.

Key words: oil/gas filed exploration and production; reservoir description; 3D reservoir modeling; model quality control