



成都理工大学
能源学院
60周年校庆文集

CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
COLLEGE OF ENERGY
THE 60TH ANNIVERSARY

碎屑岩油气藏相控

地质建模技术研究与应用

董 伟 著



科学出版社

碎屑岩油气藏相控地质建模 技术研究与应用

董 伟 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以碎屑岩油气藏为目标,详细介绍相控地质建模的确定性建模方法。该方法首先利用沉积相和流体相(油气水分布)的控制作用,预测井间储层参数的地质趋势信息;然后结合实际钻井数据,在相的约束和指导下,进行储层参数空间分布结构分析,预测井间储层参数的分布,从而建立油气储层的地质模型。该方法适应钻井少的复杂断块油气藏,对于多结构空间分布、多河流方向、复杂油气水分布、多精度数据源等问题具有适应性,在相控下变差函数曲线容易套合拟合,并且能够解析储层参数空间分析结构,是一种相控确定性的建模方法。

书中内容为作者30年来的油气藏描述学术研究和实践,列举了数个相控建模实例,可供油气藏描述与评价领域的研究者参考使用,也可供相关专业的研究生教学使用。

图书在版编目(CIP)数据

碎屑岩油气藏相控地质建模技术研究与应用 / 董伟著. —北京: 科学出版社, 2016.9

ISBN 978-7-03-050075-5

I. ①碎… II. ①董… III. ①碎屑岩-油气藏-地质模型-研究
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 233811 号

责任编辑: 杨 岭 郑述方 / 责任校对: 韩雨舟

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年9月第一次印刷 印张: 12

字数: 290千字

定价: 120.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



董伟，男，汉族，1962年8月生，1983年7月毕业于西南石油学院采油工程专业，进入原成都地质学院石油系任教，2008年取得博士学位，现成都理工大学能源学院教授，曾任石油工程系主任。从事石油工程专业的教研、教学和管理工作的，从事油藏工程和开发地质方向的学术、科研和人才培养。先后主持完成30余项科研，发表学术论文20余篇，出版教材和专著4部，获得国家科技进步三等奖1项、省部级科技进步二等奖3项、四川省教学成果三等奖1项、省部级科技进步三等奖4项。

前 言

现代油气藏管理的两大支柱是油气藏描述和油气藏模拟，油气藏描述的最终结果是油气藏地质模型，即油气藏及其属性的三维分布模型。因此，油气藏地质建模技术是油气藏精细描述的核心技术。油气藏地质建模技术的关键问题是井间储层参数预测方法，涉及井间储层参数预测的数学问题和已知信息的数量与质量问题。

2000 年以来，作者长期在国内各大油田进行油气藏描述和储层建模研究，逐步建立和完善了一套以井间储层参数相控模拟和预测为主的碎屑岩油气藏相控地质建模技术和方法。诚以本书阐述这一建模技术方法的研究思路、基本原理、计算步骤和软件技术，并介绍了 6 个建模实例供参考。

考虑碎屑岩油气藏的形成主要受控于沉积、成岩、构造等诸多因素，特别是致密低渗和复杂断块的油气藏，沉积微相和油气水分布对油气藏起着至关重要的作用。而油气水分布具有沉积和构造的成因，可以视为“流体相”分布。因此，利用沉积相和流体相的控制作用，研究井间储层参数地质趋势信息的获取方法，以及井间储层参数预测的相控约束方法，从而进行碎屑岩油气藏相控地质建模，称为“相控建模”。

本书所提出的相控建模技术方法，包含了作者在储层建模方面的创新技术和研究成果。首先是相控建模结合克里金技术，使相控建模获得唯一的预测结果，是一种确定性相控建模技术，到目前为止在国内外文献中尚未见到与此类似的方法；其次是运用流体相与沉积微相复合控制来预测有效厚度分布模型，用流体相控制来预测含水饱和度分布模型，其原理和方法到目前为止在国内外也属首创。并且书中首次提出“流体相”概念，在国内外首次把油气水分布与岩性和构造的关系提升到成因相的层次，并应用于相控建模。

书中还介绍在实验变差函数的计算，在单一方向的变差函数的拟合，在多方向变差函数的套合拟合，均采取相控技术，实现全过程的相控变差函数拟合的创新技术；以及三角蛇行搜索法，实现虚拟井自动提取和优化的关键技术；还有估值前相控选点、估值中相控修正邻域各向异性方向、估值后相控检验和校正等，实现相控克里金估值的关键技术。

由于相控建模技术采用沉积微相和流体相进行复合相控建模，使之特别适合于复杂断块油气藏和致密低渗油气藏，对我国中部凹陷断块性油气藏和我国中西部致密低渗油气藏的深入研究和开发具有广阔的应用前景。本书可供油气藏描述与评价领域的研究者参考使用，也可供相关专业的研究生教学使用。

本书著写时得到了时志强、段新国、何勇明、张浩、陈克勇、王勇飞等的帮助，并且得到了胜利、华北、中原、青海、长庆和四川等油气田相关单位的支持，在此表示深深的谢意。

本书内容为作者 30 年来的油气藏描述学术和科研成果，列举的油气储层建模实例，

希望对读者在油气藏描述与评价领域的研究有所参考，也希望能对相关专业的研究生教学有所帮助，并以此书祝贺成都理工大学建校 60 周年。

书中若有不当或错误之处，望读者不吝指正。

2016 年 3 月于成都

目 录

第1章 概论	1
1.1 储层地质建模技术综述	1
1.1.1 确定性建模方法	1
1.1.2 随机性建模方法	2
1.2 相控建模理论与技术方法简介	6
1.3 技术应用与推广前景	9
1.3.1 技术应用	9
1.3.2 推广前景	12
第2章 统计学插值方法	14
2.1 统计学插值方法的基本原理	14
2.1.1 反距离加权法	14
2.1.2 趋势面法	15
2.1.3 叠加法	18
2.1.4 改进谢别德法	19
2.1.5 切平面截距加权法	20
2.1.6 最小曲率法	21
2.1.7 径向基函数法	24
2.1.8 自然邻点法	25
2.1.9 最近邻点法	31
2.2 网格节点构建方法	31
2.2.1 平面结构性网格构建方法	31
2.2.2 平面非结构性网格构建方法	34
2.2.3 纵向网格构建方法	40
第3章 沉积相控储层地质建模理论与方法	43
3.1 沉积相对储层的控制作用	43
3.1.1 砂岩厚度在沉积微相上的统计特征	43
3.1.2 孔隙度在沉积微相上的统计特征	45
3.1.3 渗透率在沉积微相上的统计特征	45
3.2 沉积相控储层地质建模步骤	47
3.2.1 建立沉积微相模型	48
3.2.2 建立沉积微相统计特征模型	49
3.2.3 建立储层参数相控地质趋势模型	50

3.2.4 克里金估值方法的原理	51
3.2.5 相控变差函数拟合	57
3.2.6 相控克里金估值	61
3.3 沉积相控储层地质建模的影响因素	61
第4章 复合相控油气藏地质建模理论与方法	64
4.1 流体相对油气藏的控制作用	64
4.1.1 油气水分布特征	64
4.1.2 流体相控制作用在净储比上的体现	66
4.1.3 流体相控制作用在饱和度上的体现	67
4.2 复合相控油气藏地质建模步骤	68
4.2.1 建立流体相模型	68
4.2.2 建立流体相统计特征模型	69
4.2.3 建立油气藏参数相控地质趋势模型	70
4.2.4 复合相控变差函数拟合	71
4.2.5 复合相控克里金估值	72
4.3 复合相控油气藏地质建模的影响因素	73
第5章 相控地质建模关键技术	76
5.1 虚拟井位优化方法	76
5.2 相控地质趋势模拟技术	78
5.3 相控变差函数最优套合技术	79
5.3.1 多级球形叠合模型最优拟合技术	79
5.3.2 相控地质趋势模型的趋势变差函数曲线	81
5.3.3 沉积微相估算各向异性比和最大变程方向	82
5.4 相控地质建模软件技术	84
5.4.1 数据准备	85
5.4.2 沉积微相控制模型	89
5.4.3 流体相控制模型	91
5.4.4 相控克里金展布	93
5.4.5 储层参数分布与评价	94
第6章 应用实例	100
6.1 孤岛油田中一区 11J11 井区 Ng3~6 砂层组井间参数预测研究	100
6.1.1 概况	100
6.1.2 相关研究成果	101
6.2 鄂尔多斯盆地长庆气田上古气藏砂体分布规律研究	111
6.2.1 概况	111
6.2.2 相关研究成果	112
6.3 濮城油田卫 79—濮 95 块油藏精细描述	117
6.3.1 概况	117

6.3.2 相关研究成果	119
6.4 尕斯库勒油田 E3 ¹ 油藏精细数值模拟研究	128
6.4.1 概况	128
6.4.2 相关研究成果	129
6.5 留西油田低渗透油藏开发技术对策研究	139
6.5.1 概况	139
6.5.2 相关研究成果	140
6.6 文 31 断块综合调整治理方案编制	151
6.6.1 概况	151
6.6.2 相关研究成果	152
6.7 总结	164
附录	167
参考文献	178
索引	181

第 1 章 概 论

1.1 储层地质建模技术综述

在外文文献中,油藏和储层都是“reservoir”这一通用术语,因为开发阶段所要研究的构造是储层的构造,流体分布是储层内油、气、水的分布,而储层本身的非均质性更是油藏描述的重点。因此,我们习惯把“reservoir description”译为“油藏描述”,而“储层描述”则指狭义的储层本身特征的研究,不包含储层构造和流体的内容。所以开发地质工作的主要任务是进行油藏描述,储层描述则是油藏描述的核心。油藏描述的任务就是揭示油藏的开发地质特征,在油气田勘探评价和开发阶段,储层研究的目标是建立定量的三维储层地质模型,这是油气勘探开发深入发展的要求,也是储层研究向更高阶段发展的体现。现代油藏管理的两大支柱是油藏描述和油藏模拟,油藏描述的最终结果是油藏地质模型,而油藏地质模型的核心是储层地质模型,即储层属性的三维分布模型。

储层建模(reservoir modeling)是国外 20 世纪 80 年代中后期开始发展起来的储层表征(reservoir characterization)新领域,其核心是对井间储层进行多学科综合一体化、三维量化及可视化的预测。近年来,该领域的发展十分迅速,数学地质和计算机工作者致力于发展各种建模方法,特别是各种随机模拟方法,而储层地质工作者则研究各种建模方法的地质适用性,并力求改进方法以建立符合实际地质的三维储层地质模型。

根据储层建模结果的唯一性可以把储层建模划分为两种基本途径,即确定性建模(deterministic modeling)和随机性建模(stochastic modeling)。

1.1.1 确定性建模方法

确定性建模是对井间未知区域给出确定性的预测结果,即从具有确定性资料的控制点(如井点)出发,推测出井间确定的、唯一的储层参数。然而,在资料不完善以及储层空间结构和储层参数空间变化比较复杂的情况下,人们难于掌握任一尺度下储层确定且真实的特征或性质,也就是说,在确定性模型中存在着不确定性。目前,确定性建模所应用的储层预测方法主要有储层地震学、储层沉积学及地质统计学的克里金(Kriging)方法。

1. 储层地震学方法

储层地震学方法主要是应用地震资料研究储层的几何形态、岩性及参数的分布,即从已知井点出发,应用地震横向预测技术进行井间参数预测,并建立储层的三维地质模型。该方法主要包括三维地震和井间地震方法(胡勇等, 2011; 李绪宣等, 2011; 霍春亮

等, 2007)。

(1) 三维地震方法: 三维地震资料具有覆盖面广、横向采集密度大的优点。应用三维地震资料(主要是利用地震属性参数, 如层速度、波阻抗、振幅等), 结合井资料和 VSP 资料, 可在油藏评价阶段建立油组或砂组规模的储层地质模型, 主要确定地层格架、断层特征、砂体的宏观格架及储层参数的宏观展布。

(2) 井间地震方法: 由于井间地震方法采用了井下震源及邻井多道接收, 因而比地面地震(如三维地震)具有更多的优点: 有较高的信噪比、增加了地震信息的分辨率、利用地震波的初至可准确地重建速度场, 从而大大提高了井间储层参数的解释精度。

2. 储层沉积学方法

储层沉积学方法主要是在高分辨率等时地层对比及沉积模式基础上, 通过井间砂体对比建立储层结构模型。

井间砂体对比是在沉积模式和单井相分析的基础上进行的。传统对比方法主要依据井间测井曲线的相似性或差异性来进行井间砂体解释。实际上, 科学的井间砂体对比应是利用多学科方法(层序地层学原理、沉积学原理、高分辨率地震勘探资料及地层测试资料等)进行综合一体化的解释过程(于兴河和陈永峤, 2004; 王多云等, 2004)。

3. 克里金方法

克里金方法是以变差函数为工具进行井间插值而建立的储层参数模型。井间插值是建立确定性储层参数分布模型的常用方法。该方法大致可以分为传统的统计学插值方法和地质统计学估值方法(主要是克里金方法)。由于传统的数理统计学插值方法(如反距离加权平均法)只考虑观测点与待估点之间的距离, 不考虑地质规律所造成的储层参数在空间上的相关性, 因此插值精度较低。为了提高对储层参数的估值精度, 人们广泛应用克里金方法来进行井间插值。克里金法估值是根据待估点周围的若干已知信息, 应用变差函数所特有的性质对估点的未知值作出最优(即估计方差最小)、无偏(即估计值的均值与观测值均值相同)的估计(张一伟等, 1992), 详见 3.2.4。

4. 统计学插值方法

传统的统计学插值方法主要有: 反距离加权法、趋势面法、叠加法、改进谢别德法、切平面截距加权法、最小曲率法、径向基函数法、自然邻点法、最近邻点法等, 详见第 2 章。

1.1.2 随机性建模方法

所谓随机建模, 是指以已知的信息为基础, 以随机函数为理论, 应用随机模拟方法, 产生可选的、等概率的储层模型的方法, 即对井间未知区应用随机模拟方法给出多种可能的预测结果。这种方法承认控制点以外的储层参数分布具有一定的不确定性, 即具有一定的随机性。因此采用随机建模方法所建立的储层模型不是一个, 而是多个, 即对同

一储层,应用同一资料、同一随机模拟方法可得到多个实现(可选的储层模型)。通过各模型的比较,可了解井间储层预测的不确定性,以满足油田开发决策在一定风险范围内的正确性。随机建模方法(李少华等,2007;王家华和张团峰,2001;陈恭洋,2000;景成杰等,2009;唐义疆等,2006;杨辉延,2004)很多,主要有标点过程、序贯高斯模拟、截断高斯随机域模拟、指示模拟、马尔柯夫随机域模拟、二点直方图法的随机模拟、相控随机建模、分形随机域模拟等,以及目前尚不成熟的多点地质统计学方法。

1. 标点过程法

标点过程法是以目标物体为模拟单元的方法,主要描述各种离散性的地质特征的空间分布,如沉积微相、岩石相、流动单元、裂缝、断层及夹层等地质特征的空间分布,利用标点过程法(布尔方法)建立离散性模型。

标点过程法是以点过程的概率定律,按照空间中几何物体的分布规律产生这些物体的中心点的空间分布,然后将物体性质(如物体几何形状、大小、方向等)标注于各点之上。从地质统计学角度来讲,标点过程模拟是模拟物体点及其性质在三维空间的联合分布。

标点过程法的优点是运算速度快、方法简单和容易理解。该方法在许多方面有了改进,如难于忠实井资料和地震资料、目标物体形状简单化、仅适合于稀井网等。但是,在其应用中要有很强的先验地质知识,如各相的体积含量、各相几何形态(李霞等,2009)。

2. 序贯高斯模拟法

序贯高斯模拟是高斯模型常用的一种模拟方法。它是应用高斯概率理论和序贯模拟算法产生连续变量空间分布的随机模拟方法。模拟过程是从一个象元到另一个象元序贯进行的,而且用于计算某象元的条件累积分布(ccdf)的条件数据除原始数据外,还考虑已模拟过的所有数据。从ccdf中随机地提取分位数便可得到模拟实现。

模拟结果产生高斯分布变量的实现,必须进行反转换。它的优点是:①算法稳健,用于产生连续变量的实现;②当用于模拟比较稳定分布的数据时,序贯高斯模拟能快速建立模拟结点的ccdf,然而当模拟级差较大的变量数据时,高斯矩阵不稳定,且不能用于类型变量的模拟。

序贯高斯模拟是应用极为广泛的一种连续变量的模拟方法。该方法快速简单,比较适合模拟连续地质变量,特别是一些中间值很连续且极值不是很分散(即非均质性相对较弱)的储层参数,如孔隙度、地震反射界面的构造图等。如果在高斯模拟中引入第二变量,可以进行序贯高斯协同模拟,又称其为多元序贯高斯模拟。由于可综合第二类信息对模拟变量的影响,该方法是一种更为有效的连续地质参数的模拟方法。在用该方法进行储层建模或储层预测研究时,可使模拟结果更真实、准确地反映参数的地质意义(李霞等,2009)。

3. 截断高斯随机域模拟法

截断高斯随机域属于离散随机模型,用于分析离散型或类型变量。模拟过程是通过一系列门槛值及截断规则网格中的三维连续变量而建立离散物体的三维分布。

该方法的优点是:①易于实现、速度快;②可在模拟中考虑地质因素;③可以对模拟结果进行条件限制,使之与条件数据相吻合(李霞等,2009)。

4. 指示模拟法

指示模拟既可用于离散的类型变量,又可用于离散化的连续变量类别的随机模拟。指示模拟的重要基础是指示变换和指示克里格。指示变换的最大优点是可将软数据(如试井解释、地质推理和解释)进行编码,继而可使其参与随机模拟。

指示模拟最大的优点是可以模拟复杂各向异性的地质现象,各个类型变量均对应于一个变差函数。也就是说,对于具有不同连续性分布的类型变量(相),可指定不同的变差函数,从而可建立各向异性的模拟图像。另外,指示模拟除可以忠实于硬数据(如井数据)外,还可以忠实于软数据。其缺点是:

(1)模拟结果有时并不能很好地恢复输入的变差函数;

(2)在条件数据点较少且模拟目标各向异性较强时,难以计算各类型变量的变差函数;

(3)不能很好地恢复指定的模拟目标的几何形态(尤其是相边界),一些类型变量是以一个或几个象元为单元零星地分布(李霞等,2009)。

5. 马尔柯夫随机域模拟法

马尔柯夫随机域既可用于离散物体,亦可用于离散化连续变量类别的随机模拟。其基本性质是某一象元、某类型变量条件概率仅取决于邻近象元的值。在实际应用中,条件概率常表达为邻近象元之间相互关联的指数函数。模拟算法常采用迭代算法,开始时给定一个非相关的初始图像,然后逐步进行迭代,直到满足指定的条件概率分布为止。

马尔柯夫随机域及半马尔柯夫随机域模拟法的优点在于,再现每一种状态复杂的非均质性的能力较强,适合于镶嵌状分布的相(或岩性)的随机模拟以及单一类型的相或岩性分布(如砂体内钙质胶结层的分布)。其缺点是:条件概率的确定相当复杂,特别是在条件数据有限时更为困难;难以很好地恢复相的几何形态;难以应用软数据(虽然很容易忠实硬数据);模拟收敛很慢。目前这类模型应用很少,且主要限于二维空间(李霞等,2009)。

6. 二点直方图法的随机模拟法

二点直方图主要用于类型变量的随机模拟,它属于二点统计学的范畴。其主要特征是在空间范围内2个相距一定距离的象元分属于不同类型变量的转换概率分布,在特定偏移距所有两元类型变量的转移概率即构成二点直方图模型,主要应用优化算法(如模拟退火)进行随机模拟。

二点直方图适用于镶嵌状分布的沉积相(或岩性)的随机模拟,亦可用于只有2个相的沉积相的随机模拟。在实际应用中,二点直方图常在模拟退火中作为其他随机实现的后处理,但不能很好地恢复相几何形态(李霞等,2009)。

7. 分形随机域模拟法

分形随机域的最大特征是局部与整体的相似性。在分形模拟中,主要应用统计自相

似性,即任一规模上变量的方差与其他规模上变量的方差成正比,其比率取决于分形维数(或间断指数)。分形模拟一般采用误差模拟算法,其模拟实现为克里格估值加上随机“噪音”,分形随机域的自相似性是它最大的优点(李霞等,2009)。

8. 相控随机建模方法

相控随机建模就是以密集井网测井解释资料为基础,以沉积微相平面分布作为边界条件,采用随机建模算法建立储层岩相(岩性)及其内部孔渗饱属性模型。由于同一微相内部,垂向上岩相(岩性)差异较大,孔渗饱属性值域很宽,相控孔渗饱属性模型不确定性仍较大,主要原因是随机抽样取值不准,具体表现为:在相控条件下的岩相(岩性)模型与孔渗饱属性模型匹配性较差,好的岩相(岩性)内部往往出现孔渗饱属性低值,而差的岩相(岩性)内部往往出现孔渗饱属性高值(张旺青等,2008;邓万友,2007;左毅等,2006;于兴河等,2005)。

9. 多点地质统计学方法

基于变差函数的传统地质统计学属于两点统计学,只能考虑空间两点之间的相关性,难于精确表征具有复杂空间结构和几何形态的地质体。而多点统计学则着重表达多点之间的相关性,应用“训练图像”代替变差函数表达地质变量的空间结构性,因而可克服传统地质统计学不能再现目标几何形态的不足,同时,由于该方法仍然以象元为模拟单元,而且采用序贯算法(非迭代算法),因此很容易忠实硬数据,并具有快速的特点,故克服了基于目标的随机模拟算法的不足。

过去10多年中多点地质统计学已经发展到石油工业应用中。多点地质统计学使用训练图像代替传统的两点地质统计学的变差函数,允许整合更复杂的地质信息到储层模型中,更适合复杂的井间储层预测。

然而,多点地质统计学目前仅能够描述离散性概念的空间结构,国内外多进行沉积相模拟,SNESIM算法能够快速模拟诸如辫状河流等复杂沉积相分布(详见附录),FIL-RERSIM算法更适合于孔隙结构模拟。国内外对于用多点地质统计学描述连续性数值变量的研究较少,仅见有初步用门槛值分级趋势模拟的方法,而恰恰描述诸如砂岩厚度、孔隙度、渗透率等连续性储层参数的数值分布是油藏描述研究的重要内容。因此,多点地质统计学对连续性数值变量描述的理论和方法亟待发展。

两点地质统计学使用变差函数模拟储层分布结构,具有两点性缺陷,但能模拟连续性参数,是数值性模拟算法;多点地质统计学使用训练图像,允许整合更复杂的地质信息,具有人类视觉认知事物的优点,更适合于非连续性参数的模拟,偏向于概念性模拟算法。如何把两种方法结合起来,优势互补,成功地模拟连续性的储层参数分布,是目前较前沿的研究内容。

综上所述,目前储层地质建模技术的发展主要集中在地质统计学克里金方法和随机建模技术方法方面。但不管是确定性建模技术方法,还是不确定性建模技术方法,它们都以模拟储层参数的空间分布结构和变化为己任,从而受控于变差函数。而以训练图像代替变差函数的多点地质统计学方法尚处于发展初期,只能有限地预测沉积相分布(石书

缘等, 2011; 吴胜和等, 2005; Yuhong Liu, 2006)。

1.2 相控建模理论与技术方法简介

我们通过 30 来年的油气藏地质建模工作, 积累了先进的技术理论方法和经验。我们认为油气藏地质建模的关键是井间储层参数预测, 而井间储层参数预测的最关键性问题, 既不是空间结构分析方法问题, 也不是网格点估值方法问题, 而是已知信息的数量和质量问题。不管是克里金建模技术, 还是随机建模技术, 都是以不同的技术方法, 在已知信息的基础上尽量预测和描述准确而已。但是, 如果已知信息点数量不够, 内含的分布结构不完整, 则空间分布结构分析可能会失真, 或者无法获取, 那么就不可能准确预测未知点储层参数。因此, 油气藏地质建模的根本性问题是“如何在井间挖掘更多更好的信息”, 特别是那些趋势性的、规律性的地质信息。虽然这些信息在描述局部储层特征时误差大、可信度不高、但其数量大、内含空间分布结构的信息。有了这些富含地质趋势特征信息的协同, 就可以避免空间分布结构分析的失真, 增加待估点邻域内已知的信息量, 提高井间储层参数预测的精度。

碎屑岩油气藏的形成主要受控于沉积、成岩、构造等诸多因素, 特别是致密低渗和复杂断块的油气藏, 沉积微相和油气水分布对油气藏起着至关重要的作用。而油气水分布的特征或模式, 广义上也可以视为“流体相”分布。因此, 利用这种“沉积相和流体相的相控作用”, 研究油气藏储层参数预测的相控建模技术, 并将其应用于碎屑岩油气藏精细描述的建模工作。

近几年我们一直致力于相控建模方法的研究和应用, 在胜利油田、长庆气田、中原油田、青海油田、华北油田和四川等地的油气藏描述建模工作中, 逐步形成了一整套以井间储层参数相控模拟和预测为主的碎屑岩油气藏相控地质建模技术和方法。主要由以下理论与技术方法组成。

1. 确定性相控建模理论与方法

对于陆相河流沉积体系的碎屑岩储层, 由于河流的演变和水动力条件的变化, 导致沉积环境不同, 成岩后表现出不同沉积微相的砂岩厚度和平面分布形态, 孔隙度和渗透率的变化大小和方向等各不相同。储层参数统计特征反映出不同沉积微相的沉积特征, 反过来不同沉积微相的沉积特征也就决定了储层参数的统计特征, 即沉积相对储层具有明显的控制作用。

运用沉积相对储层的控制作用来预测井间储层参数, 分两步建立储层参数分布的确定性模型。首先, 利用沉积微相对储层的控制作用, 实现地质条件约束下的井间储层参数趋势预测, 建立储层参数相控趋势模型; 然后, 以虚拟井的方式提取井间储层参数趋势信息, 与实际井点获取的储层参数共同进行储层空间分布结构分析, 并进行相控克里金展布, 最终建立确定性的储层参数分布模型。

与其他相控建模方法是随机性建模不同, 本书提出的是确定性相控建模理论和方法, 并在 2003 年发表于《石油勘探与开发》“预测井间储集层参数的相控模型法(董伟和冯方

2003)”。就目前文献查阅,其他相控建模方法均为随机建模方法,即不确定性相控建模方法,所得到的是等概率的几个可选择模型,但使用者有时很难选择。本书提出的相控建模所得到的是唯一的储层模型不用选择。

2. 复合相控建模理论与方法

油气运移至储集岩,在有利的圈闭条件下形成油藏。因此,油层受到沉积、岩性和构造的多重控制,形成了目前的油气水分布。这种多因素条件下的油气水分布模式,控制了有效厚度的分布格局,同时也控制了含水饱和度或含油饱和度的分布。由于油气水分布实际上就是储层中流体相的分布,因此油层参数受到沉积相和流体相的复合控制。

使用沉积微相控制预测井间砂岩厚度、孔隙度和渗透率分布,使用沉积微相和流体相复合控制预测井间有效厚度分布,使用流体相控制预测井间饱和度分布,称这种油气储层参数相控建模方法为“复合相控建模”,2008年发表于《成都理工大学学报(自然科学版)》“油气储层参数建模的‘复合相控模型’法(董伟等,2008)”。

3. “流体相”概念的提出

在油气开发中,油气水分布受到构造和岩性的控制,特别是断层和沉积相。不同的沉积环境和构造特征,形成不同的油气水分布模式。每一个油气水层,每一个含油区、含气区、含水区,都有不同的边界形态和类型,以及组合关系,即具有某种成因条件。因此,我们把油气水分布模式定义为“流体相”。此处的相不是相态,是一种流体存在的成因相或成因类型,如沉积相一样。

董伟等(2008)首次把油气水分布模式以成因相的内涵定义为“流体相”概念,并应用于复合相控建模。虽然与龙国清(2007)提到的流体相同名,但实质不一样。他所提到的流体相仍然是流体“相态”,是考虑某种流体的存在对地球物理的影响来建模,而不是这种流体的成因对建模的影响。

流体相与流体相态的区别在于,一种流体只有一种相态,但可以有不同的成因“相”,譬如岩性圈闭、构造圈闭、岩性+构造圈闭、断层圈闭、岩性+断层圈闭、岩性+构造+断层等,这些圈闭条件下形成的含油气区就是流体相。因此,流体相就是地下流体在不同圈闭条件下在特定地层的存在形式,它就是目前现场上使用的小层平面图上所画出的油气水分布,或者油气水关系。

4. 相控地质趋势模拟方法

确定性相控建模的第一步是利用沉积相或流体相的统计特征模拟储层参数的地质趋势分布,为井间储层参数预测提供一个趋势意义上的软信息数据集集体。

首先建立相控均值模型,即给沉积相或流体相赋予对应的相控参数值和概率值,建立单层相控参数值和概率值的“平台模型”。

然后,模拟沉积相和流体相内和相之间储层参数的趋势变化特征,模拟中考虑了流体相不同边界类型的变化特征。在平台模型中以实际井点参数值为约束条件,利用了趋势残差叠加理论和随机理论模拟相内数值变化趋势和取值概率。

最后,利用概率模型计算相控预测可信度,通过等效校正,最终建立储层参数相控地质趋势模型。等效校正中,采用累积概率曲线转换法,校正了同相、同层和全局的均值和概率分布,使相内、层内和全局的钻井参数与趋势模型的均值及概率直方分布达到一致。

5. 相控变差函数最优套和拟合方法

确定性相控建模的第二步是利用实际井点和虚拟井点的储层参数进行空间分布结构分析和克里金展布。由于虚拟井点数据来源于相控模型,相控模型的数据是反映地质趋势特征的灰色数据。因此,计算实验变差函数时考虑数据点对的灰色程度或可信度,计算出的实验变差函数我们称为“软”实验变差函数。而且剔除了断层线两侧不连续性参数分布的数据点对,使相控模型数据的加入,提高了实验变差函数的质量,降低了实验变差函数失真的风险。

实验变差函数曲线通常受数据点对的数量、精度和分布质量的影响,曲线起伏不定,不仅单方向拟合难度较大,而且多方向套和拟合难度更大。譬如,河流大角度分支、大幅度弯曲、多方向流入(多物源方向沉积)、湖浪或海浪的改造,以及古地貌对沉积的影响等,造成不同方向上的实验变差函数曲线的形态差异很大,给理论变差函数曲线的套和拟合带来很大困难。因此,单一方向上,我们利用相控模型中的灰色数据信息,计算出趋势性实验变差函数曲线,供单方向变差函数曲线拟合时参考,采用多级球形套合模型进行最优拟合。同时,利用沉积相分布形态估算出各向异性比和最大变程方向,供多方向套和拟合时参考。

从实验变差函数曲线的计算开始,直到套和拟合结束,全程受到沉积相或流体相分布特征的指导。这种方法称为“相控变差函数最优套和拟合法”,实现了储层参数空间分布结构的相控分析法。

6. 虚拟井位优化方法

变差函数计算和拟合及克里金展布,都要以大量的虚拟井为基础。虚拟井如何提取,提取多大的数量,均会影响到相控建模的最后质量。钻井少而储层复杂的地区,则需要较多的虚拟井。但虚拟井太多,又会减弱实际钻井信息的作用,造成“喧宾夺主”现象。因此,虚拟井的位置是相控建模的主要影响因素之一。

本着以最少的虚拟井提取最多量的地质趋势信息的原则,我们采用三角蛇行技术,在井间搜寻和评价钻井控制程度低和沉积微相复杂的区域,实现了虚拟井自动提取和优化的目的,较好地解决了实际钻井和虚拟井之间的“主次矛盾”。

7. 相控克里金估值方法

相控建模的最后一步是实际钻井与虚拟井数据的相控克里金估值,分层建立各储层参数的网格数据模型。估值方法本身与常规克里金估值方法相同,但在估值之前需根据沉积相和流体相特征优选参估数据点,剔除与待估点无关的数据点,特别是断层线两侧的不连续性参数。突出与待估点关系密切的数据点,特别是体现局部趋势的数据点。