

·勘探技术·

一种三维地层流体势的计算方法及其应用

刘劲歌¹,樊洪海¹,冯德永²,李朝玮¹,耿智¹,陈绪跃¹,彭齐¹

(1.中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249;

2.中国石化胜利油田分公司物探研究院,山东 东营 257022)

摘要:流体势是控制地层烃类运移和聚集的重要因素。综合利用三维地层压力和 Hubbert 流体势模型建立了三维地层流体势的计算方法,即利用测井约束地震反演求取三维地震层速度体,结合已钻井的测井资料,以单点算法假设和克里金插值算法为基础求取三维地层压力,然后根据三维地层流体势和三维地层压力的对应关系计算得出三维地层流体势。以胜利油区博兴洼陷高 89 井区为例,对其三维油势进行计算,进而分析油势的分布特征及其在预测油气优势运移方向和有利聚集区带中的应用。研究表明,与常规的流体势等值线图相比,该方法计算的三维地层流体势在横向和纵向上的精度较高、连续性较好,便于得到各深度及各层位切片上的流体势分布特征,预测的油气低势区与实际生产情况较为吻合。

关键词:三维地层流体势 三维地层压力 油气运聚 单点算法假设 克里金插值 博兴洼陷

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)03-0041-04

20 世纪 50 年代,Hubbert 等通过研究地下流体(油、气、水)的运动规律,提出了盆地中油气运移的流体势理论^[1-3]。流体势在研究油气运聚时具有重要作用,地层孔隙流体的运移与聚集过程受流体势分布的控制,流体总是由高势区向低势区流动。通过对地下流体势空间分布的研究,可寻找油气低势区,明确油气有利聚集区带,为后续的油气开发奠定基础^[4]。

近年来,许多学者利用绘制流体势等值线图的方法来研究油气的运聚,对预测未知或隐蔽油气聚集区具有一定的指导作用^[5-8]。但绘制流体势等值线图受井位置和计算精度等因素的影响较大,且由于地层变化复杂,当研究区较小、变化趋势不明显时,其插值结果的精度较低,甚至会得到完全错误的结果。为此,笔者通过求取三维地层压力,根据三维地层流体势与三维地层压力的对应关系建立了三维地层流体势的计算方法,以期对研究区后续的油气开发提供参考。

1 流体势计算原理

Hubbert 用流体势的概念深入阐述了地下流体

的运移规律,其计算公式^[1]为

$$\Phi = gZ + \frac{p}{\rho} \quad (1)$$

式中: Φ 为流体势, J/kg; g 为重力加速度, m/s²; Z 为测量点距某一基准面的高程, m; p 为测量点的地层压力, Pa; ρ 为测量点的地层流体密度, kg/m³。

gZ 可视为单位质量流体从选定基准面移至高程为 Z 处克服重力所做的功, p/ρ 可视为单位质量流体从压力为 0 处移至压力为 p 处克服压力所做的功。

2 参数求取

2.1 三维地层压力

地层压力是油气生成、运移和聚集的前提与基础。三维地层压力是求取三维地层流体势的前提和关键。目前,用于确定和预测地层压力的方法有很多种,主要包括测井资料地层压力检测、随钻地层压力监测、地震资料地层压力预测以及实测地层压力分析 4 大类。笔者根据地震层速度数据,采用单点算法假设及克里金插值算法计算得到三维地层压力^[9-11]。

收稿日期:2014-03-15。

作者简介:刘劲歌,男,在读硕士研究生,从事地层压力预测与分析研究。联系电话:(010)89733221,E-mail:Petro_Jack@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“窄密度窗口安全钻井技术与配套装备”(2011ZX05021-003),国家自然科学基金项目“高压气井内高速流体诱发生产管柱振动特性研究”(51274219)。

2.1.1 单点算法假设及克里金插值算法

所谓单点算法假设是指在利用层速度计算地层压力时,假设层速度与地层压力之间为简单的一一映射关系。即1个层速度点对应1个地层压力点,层速度高计算出的地层压力低,层速度低则计算出的地层压力高。点与点之间是各自独立的,不考虑各点之间的相互影响以及上、下地层之间的逻辑关系^[9]。在这种假设条件下,将每1个地震道看作1口虚拟井,采用类似于单井声波测井资料检测地层压力的方法逐点逐道计算地层压力。

克里金插值算法^[12-13]是一种无偏的(即偏差的数学期望为0)、方差最小的最优内插法,其不仅考虑了观测点与被估计点的相对位置,还考虑各观测点之间的相对位置关系;而一般的插值方法仅考虑各观测点与被估计点之间的关系。近几年,克里金插值算法的理论和应用得到了蓬勃发展,并成功应用于地质、石油勘探及采矿等领域。

2.1.2 三维地层压力计算步骤

假设一个三维地层压力计算的目标区块^[11],通过地震反演技术^[14-15]得到该区块的层速度。A、B、C、D和E井分别为目标区块已钻井,且已知这些井的测井资料。X地震道为目标区块中将要进行地层压力计算的某一地震道,可以看作1口虚拟井。其三维地层压力计算的流程(图1)为:①优选并分析已钻井(A、B、C、D和E井)的地质分层、地层岩性等资料,对其在垂向上进行分层,并确保各井分层数据一致。利用测井资料分层求取各井的地层压力,并确定各井的分层地层压力计算模型经验系数。所选的已钻井尽可能为深井、直井、详探井,且均匀分布于目标区块。为确保三维地层压力的计算精度,所选已钻井的数量不少于5口,且所选已钻井的数量越多,三维地层压力计算的精度越高。②确定已钻井的地理坐标,得到已钻井与地震道的相对位置关系。③假设计算X地震道的地层压力,已知X地震道的地理坐标,根据克里金插值算法可以对X地震道在垂向上进行分层,确定各层的底界深度及各层位的地层压力计算模型经验系数。④利用反演得到X地震道的层速度数据,结合步骤③得到的地层压力计算模型经验系数,即可逐点逐道计算该地震道上的地层压力。⑤步骤①—④得到的是散布在空间中的压力点,若求取三维地层压力,还须通过空间插值算法(笔者采用克里金插值算法)重构整个压力体。⑥利用三维可视化技术对三维地层压力进行三维显示、校对及分析。

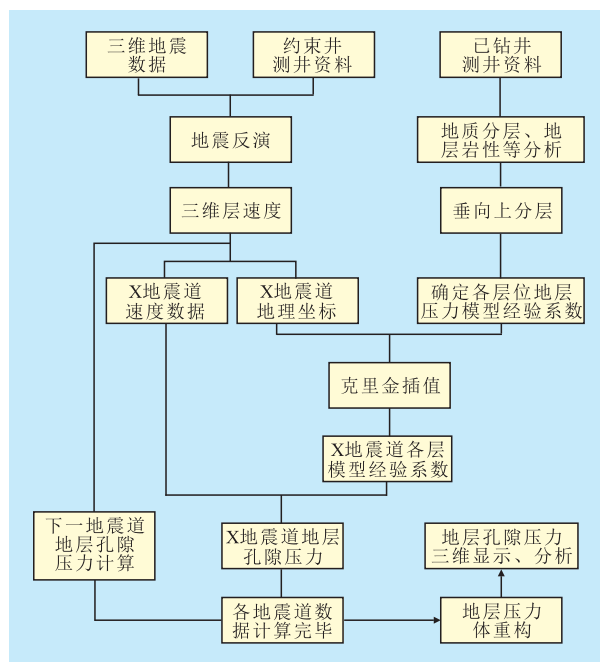


图1 三维地层压力计算流程

2.2 高程与地层流体密度

高程可由时间—深度数据转换得到。若取现今海平面为统一基准面,由于井下高程低于海平面,则其取值为负值。

地层原油密度可依据20℃时的地面原油密度,由原油体积膨胀系数与温度的关系推算,其计算公式为

$$\rho_o = \rho_o' [1 + B(T - T_0)] \quad (2)$$

式中: ρ_o 为地层原油密度, g/cm^3 ; ρ_o' 为20℃时的地面原油密度, g/cm^3 ; B 为原油体积系数,取值为 0.5×10^{-3} ; T 为地层温度,℃; T_0 为地面温度,℃,一般为20℃。

3 流体势计算

由式(1)及上述分析可知,流体势计算的关键参数为地层压力,而三维地层流体势计算的关键参数为三维地层压力。当地层流体密度和重力加速度不变时,三维地层压力与三维地层流体势存在一一对应的关系,即三维地层压力体中每一道上的某一深度下的地层压力数据均可计算得到相应高程下的流体势;通过计算机程序逐点逐道计算并插值重构得到三维地层压力数据体(SEG-Y格式),再转化为三维地层流体势(SEG-Y格式);最终利用三维可视化技术,对目标区块的流体势在纵、横向及各层位的油势、水势和气势分布特征进行分析。

4 实例应用

胜利油区博兴洼陷是东营凹陷重要的油气分布区,经过40多年的勘探开发,已达到较高的勘探程度,油气勘探的难度也越来越大;预测有利的油气聚集区,降低油气勘探风险,提高钻探成功率成为目前迫切需要解决的问题。为此,以博兴洼陷高89井区为例,综合地震、测井、地质资料及实钻信息等来进行三维油势的计算演示及分析。

4.1 三维地层压力的计算

根据Terzaghi有效应力定理^[16],地层压力等于上覆岩层压力与垂直有效应力之差。上覆岩层压力可通过确定地层体密度函数,做回归分析处理,然后对地层体密度函数在深度域上的积分来求得^[17-18]。垂直有效应力可通过声波速度模型来求得。声波速度与垂直有效应力的关系式为

$$V = a + kp_e - be^{-dp_e} \quad (3)$$

式中: V 为声波速度, km/s; a , k , b 和 d 为模型的经验系数; p_e 为垂直有效应力, MPa。

研究表明,式(3)的线性—指数模型可比较合理地描述泥质岩沉积物的声波速度与垂直有效应力之间的函数关系。通过计算,回归拟合可得到经验系数 a , k , b 和 d , 进而计算出垂直有效应力^[19]。

选取樊105、高91等10口井作为约束井来计算博兴洼陷的三维地层压力。表1为其中3口井的垂向分层数据及模型经验系数。

井号	底界埋深/m	a	k	b	d
樊105	2 470	3.8	2.7	2.9	3
	3 150	3.6	2.6	2.7	3
	3 510	3.9	2.8	2.8	3
高91	2 434	2.4	4.7	1.5	3
	3 239	2.8	4.6	1.5	3
	3 515	2.6	4.9	1.3	3
高902	2 028	3.1	4.2	1.6	3
	2 500	3.0	4.2	1.7	3
	3 020	3.2	4.4	1.9	3

利用Jason地震反演软件对博兴洼陷的地震资料进行测井约束地震反演,得到三维地震层速度体。在获得模型经验系数之后,利用反演得到的三维地震层速度数据,根据计算三维地层压力的步骤,结合编制的计算机程序即可逐点逐道计算并插值重构得到研究区的三维地层压力。

地层压力的计算精度直接影响流体势的计算

精度。为了验证三维地层压力计算结果的准确度,从该三维地层压力中提取多口已钻井的地层压力计算结果,并与测井资料计算得到的地层压力计算结果及实测地层压力进行比较。樊185井的对比结果(图2)表明,地震层速度预测的地层压力与采用测井声波检测的地层压力的趋势基本一致,吻合良好,其误差基本在10%以内。

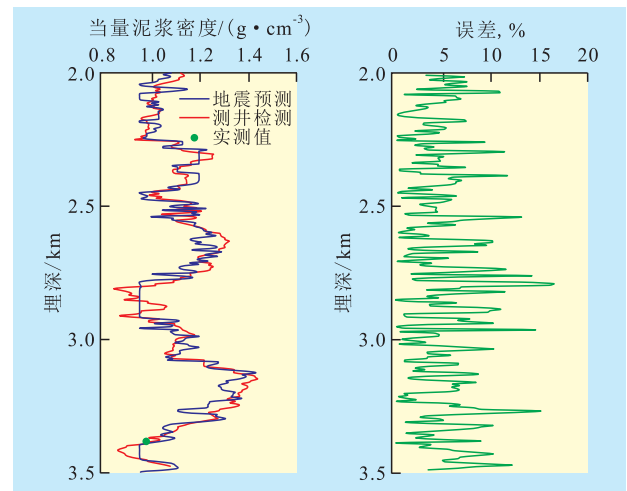


图2 博兴洼陷樊185井地层压力及误差分析

4.2 三维地层流体势计算及分析

在博兴洼陷高89井区流体势的计算过程中,取现今海平面为统一基准面。综合研究区原油样品密度测试资料,原油平均密度取值为0.87 g/cm³^[20]。通过计算机编程,由三维地层压力体数据逐点逐道计算得到研究区的三维油势(图3),进而可查看、分析不同层位及各深度下的切片,形象直观的分析油势的分布特征;且改变流体密度,即可计算出水势及气势的三维势分布。

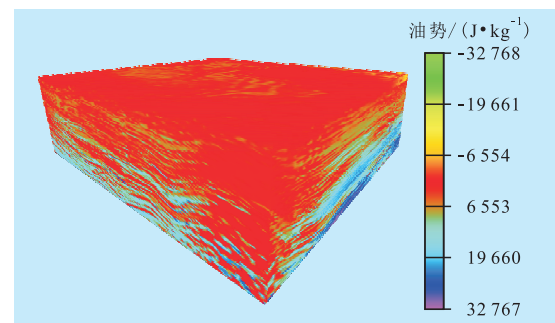


图3 博兴洼陷高89井区三维油势

由于对博兴洼陷油气成藏起主要贡献的是沙四段上亚段和沙三段下亚段烃源岩,以沙四段上亚段为例,对研究区的油势分布特征进行分析。由博兴洼陷高89井区沙四段上亚段油势分布特征(图4)可知:其油势分布可明显分为高势区和低势区。北部洼陷区的油势高,生烃作用强,烃源岩较发育,而

南部斜坡的油势则相对较低。洼陷区为主要的供流区,斜坡为泄流区,油气整体上由洼陷区向斜坡运移。研究区存在2个油势高势区并呈离心式向四周递减,离心式油势场产生的主要原因为:在压实过程中,高压泥岩向相邻的砂岩传导压力,并在势的作用下向砂岩排烃、排水;在离心式油势场的作用下,油气从生油洼陷中心沿运载层、断层及不整合面等通道向边缘地区运移、聚集。因此,樊23井、高81井、高89井及高24井附近为油势低势区或高势区中的相对低势区,为研究区油气聚集的有利地区。而实际试油结果表明,樊23井、高81井和高89井分别获得37.8,36.9和11.5 t/d的工业油流,与预测结果相吻合,为研究区重点的油气勘探方向,具有较高的开发潜力。

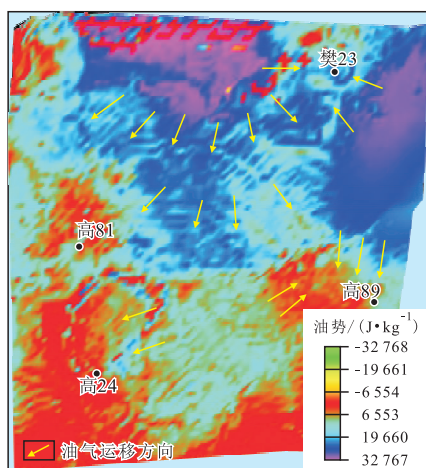


图4 博兴洼陷高89井区沙四段上亚段油势分布特征

5 结论

与绘制流体势等值线图的方法相比,利用三维地层压力和Hubbert流体势模型计算的三维地层流体势在横向及纵向上具有较好的连续性及较高的精度,可以更好地体现流体势的真实情况,便于得到各深度、各层位切片上的流体势分布特征。测井约束地震反演技术充分结合了测井资料垂向分辨率高与地震资料横向分辨率高的特点,提高了层速度的准确度,进而提高了地层压力的计算精度。通过三维可视化技术可以方便、直观地分析目标区块三维地层流体势在横向、纵向及各层位的变化特征,对油气运聚研究具有较好的指导作用。通过分析博兴洼陷沙四段上亚段油势分布特征,结合烃源岩和油气输导通道的展布特征,认为樊23井、高81井、高89井和高24井附近为有利的油气勘探区,具有较高的开发潜力。

参考文献:

- [1] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1 954-2 026.
- [2] Zawisza L, Wojna E Dylag, Smulski R. Hydrodynamic conditions of hydrocarbon migration and accumulation exemplified by the Pomorsko, Czerwinski, and Zarnowiec Oil Fields, Poland [R]. IPTC 10925, 2005.
- [3] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [4] 解玉宝. 东营凹陷牛庄洼陷地层流体演化与油气成藏[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 11-14.
- [5] 彭存仓, 谭河清, 武国华, 等. 流体势与油气运聚规律研究——以孤东地区为例[J]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 269-273.
- [6] 王德强, 柳广第. 歧口凹陷深层流体势场特征与油气运移[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 15-17.
- [7] 谢启超, 刘震. 渤南坳陷流体势演化与油气运聚[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(5): 486-488.
- [8] 谭彩萍, 江兴歌. 石油运移成藏有利区预测方法研究——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 629-635.
- [9] 樊洪海, 同辉, 林红. 准噶尔盆地莫深1井区三维压力分析[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 548-550.
- [10] 樊洪海, 叶志, 纪荣艺, 等. 三维上覆岩层压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3 878-3 883.
- [11] 纪荣艺. 三维地层压力预测方法与技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2008.
- [12] Brown P C, Falade G K. A quick look Kriging technique for reservoir characterization [R]. SPE 85679, 2003.
- [13] More H. Bayesian Kriging—merging observations and qualified guesses in Kriging [J]. Mathematical Geology, 1987, 19(1): 25-39.
- [14] 康红庆, 马春华, 宋考平. 测井约束地震反演在储层预测中的应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 14-17.
- [15] 隋淑玲, 唐军, 蒋宇冰, 等. 常用地震反演技术特点与适用条件[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4): 38-41.
- [16] Terzaghi K V. Die berechnung der durchlässigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungerscheinungen [J]. Akad Wissensch Wien Sitzungsber Mathnaturwissensch Klasse IIa, 1923, 142(3/4): 125-138.
- [17] 樊洪海, 张传进. 上覆岩层压力梯度合理计算及拟合方法[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(6): 6-8.
- [18] 李朝玮, 樊洪海, 叶志, 等. 利津洼陷古近系烃源岩异常高压计算方法与分布特征[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 38-42.
- [19] 樊洪海. 利用声速检测欠压实泥岩异常高压的简易方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(5): 9-11.
- [20] 徐伟, 宋国奇, 王建伟. 东营凹陷南坡东段沙四段原油特征及其地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 34-38.