

大牛地气田水平井水平段虚拟井位深度域反演方法及应用

秦雪霏

(中国石化 华北油气分公司 勘探开发研究院,河南 郑州 450006)

摘要:针对非均质性强烈的复杂储层水平井开发,将水平段测井资料进行采样离散化,并以虚拟直井的方式提取测井曲线,进而从深度域开展岩性随机模拟反演。该方法不仅可以将水平段测井资料有效应用,而且可以根据水平段随钻测井的逐步更新实现水平段动态定量预测。通过大牛地气田试验分析认为,该技术可明显提高单砂体顶底构造及储层内部隔夹层预测精度,对于提高水平井储层钻遇率具有显著效果。

关键词:深度域反演;虚拟直井;水平段;水平井;大牛地气田

中图分类号:TE355.6 **文献标识码:**A

Method of horizontal logging virtual well co-simulated inversion in depth domain and its application in Daniudi gasfield, Ordos Basin

Qin Xuefei

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: Aiming at horizontal well development of complex reservoir with strong heterogeneity, logging data of the lateral can be discretized in the form of virtual vertical wells, and further to carry out lithology stochastic simulation inversion in depth domain. It not only can effectively use the horizontal well logging data, but also can realize quantitative prediction of the laterals through the updating of logging while drilling in the laterals. Its application in Daniudi gasfield shows that significant improvement of prediction accuracy is achieved in respect of top and bottom structural framework of the single sand body and the barriers and baffles within the reservoir, and the reservoir penetrating ratio of horizontal wells is significantly increased.

Key words: inversion in depth domain, virtual vertical wells, horizontal section, horizontal well, Daniudi gasfield

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地北部,气层主要集中分布在上古生界下石盒子组、山西组及太原组,储层具有非常强烈的非均质性^[1-2]。2012年大牛地气田整体转为水平井开发后,结合水平井分段压裂技术有效动用3类储量^[3-4]。2012年和2013年两年累计新建天然气产能 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中水平井实施效果起到了决定性作用^[5]。在水平井实施前期,往往需要依据导眼井实钻信息进行约束反演技术,预测目标砂体顶部构造及底部构造趋势,结合预测的目标砂体空间分布及埋深变化设计水平井轨迹^[6]。

就目前水平井实施现状而言,水平井水平段测井资料无法应用于反演预测过程中,主要原因在于:①水平段测井资料并非垂直于地面的,当水平段绝对平行于地表时,目标砂体埋藏深度是唯一的,也就是说一个

埋藏深度对应无数个测井值,无法实现一个埋藏深度对应一个数值的反演原则;②由于水平段数据横向连续纵向唯一,约束反演时造成测井数据横向上难以外推,纵向上外推能力得到人为放大,失去了反演预测和单砂体顶底构造刻画的意义。鉴于以上原因,利用导眼井约束反演数据刻画的目标砂体仅仅可以用于前期轨迹设计,在实际钻井过程中无法将水平段测井资料参与到反演计算中,特别是当钻遇岩性与预测岩性不一致时,水平井轨迹只能依靠邻近直井资料以及技术人员经验做出判断,水平段测井资料得不到有效利用,风险被极大提高。

针对水平井水平段轨迹调整的问题,目前形成了基于水平井水平段虚拟直井化的深度域约束随机模拟反演方法。通过应用水平段资料开展动态定量预测,

收稿日期:2015-09-11;修订日期:2015-12-06。

作者简介:秦雪霏(1983—),男,硕士、工程师,三维地震储层预测。E-mail:82829838@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05045-02)。

动态预测钻头前方单砂体顶底构造及厚度微小变化,进而提前开展轨迹调整工作,可以大幅提高水平井水平段储层钻遇率。

1 水平井水平段随钻测井深度域反演

1.1 主要内容

本文提供一种将水平井水平段测井数据通过虚拟直井的方式参与约束反演的方法,以使水平段随钻测井资料得到有效利用进而实现动态定量预测(图1)。

1) 设置采样点,明确样点信息

根据水平段钻进长度等间隔设置采样点,明确水平井水平段录井数据、水平段随钻伽马测井数据、水平段各样点距井口南北位移、东西位移、各采样点对应的垂深、倾角及方位角,以便于形成虚拟直井。

2) 计算采样点坐标

根据所设定采样点的南北向位移和东西向位移分别计算采样点投影于地面的 XY 大地坐标,以及采样点相对井口坐标的水平位移量,并根据水平位移量大小进行排列。

3) 提取各采样点所对应的水平段测井数据

为避免采样点为单一点,其所对应的水平段测井数据唯一,不具有长度概念所造成的无法约束反演问题,沿着钻井行进方向提取采样点前后各一半于采样点间隔(或一定长度,如 10 m)范围内的水平段测井数据。

4) 形成虚拟直井

根据各采样点坐标及所提取的水平段测井数据,形成虚拟直井井位。由于仅仅提取了采样点前后一定范围的测井数据,因此虚拟直井文件中的测井数据并不完整,数据仅存在于一定深度范围内,其他深度段并无测井数据;由于新建直井并非真实从井口钻井得到,

因此定义为虚拟直井。

5) 虚拟直井重采样

对所有虚拟直井测井数据进行重采样,使垂深纵向递增量全部统一,进而和其他真实完钻的直井一起参与到深度域随机模拟反演计算中。

6) 深度域伽马曲线随机模拟反演

建立深度域地层格架,根据地质统计学反演方法将虚拟直井加入约束反演过程中,形成水平段深度域岩性反演结果。

7) 结合钻井进度动态增加虚拟直井

根据钻井进度,不断增加新的采样点并投入深度域伽马曲线随机模拟反演过程中,通过不断收集新采样点信息,进行动态预测钻头前方目标砂体的埋藏深度及厚度变化情况,以及时调整钻井轨迹。

1.2 虚拟直井形成的有效性

以虚拟直井的方式将水平井水平段测井资料进行离散化,纵向上仅提取水平段实测曲线,横向上以水平段相对井口位移量为依据,因此对水平井形成了有效的三维离散,所得数据均为实测所得,可以保证虚拟直井的有效性。

与常规直井不同,除水平段所在深度之外虚拟直井在其他深度段并无实际数据。由于水平段数据为实测得到,虚拟直井在该深度所提取的测井曲线是真实可靠的,而在此深度段之外均为空值,在反演过程中并不能够起到任何约束作用,因此虚拟直井曲线是完全真实有效的。图2中分别为实例中第2、第3及第5(A2, A3, A5)虚拟直井在水平段测井中所提取数据,在非水平段钻遇深度段内虚拟直井测井曲线均为空值,进而保证反演的真实性。需要说明的是,本文所列举实例中一次钻进 320 m 后并未钻至储层,于是进行了二次侧钻,因此 A3 及 A5 形成了两条曲线,红色箭头所示处为一次钻井实测曲线,而二次侧钻的起点位于 A2 采样点处,即水平段前 100 m 并未重复钻进,因此 A2 仅具有一条曲线。

水平井实钻过程中随着钻头的行进可确定钻头距离井口的大地坐标位移量,进而可以实时地了解到钻头所在位置。由于虚拟直井是按照水平段实钻 XY 坐标离散而成,因此虚拟直井坐标也是真实有效的(表1)。

2 反演方法及特点

如前所述,本文的关键在于将水平段随钻岩性测井资料形成离散虚拟直井,进而作为已知井参与约束反演。这个过程中完全依赖于深度域随机模拟技术,前人对此已有详细叙述并对其特点开展相关分析^[7]。由于将稀疏脉冲反演结果转换到深度域^[8]后,计算过

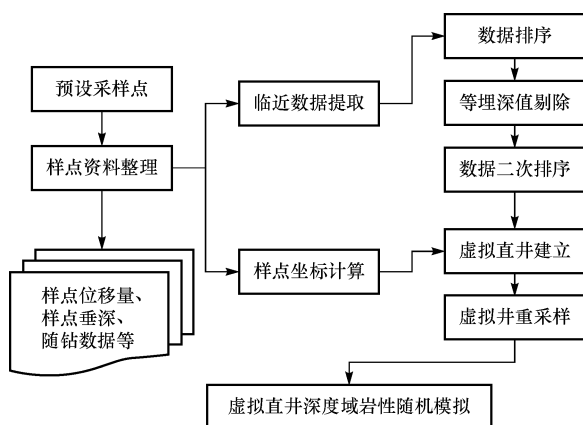


图1 水平段随钻深度域岩性随机模拟流程

Fig. 1 Process of co-simulated inversion in depth domain with horizontal well logging

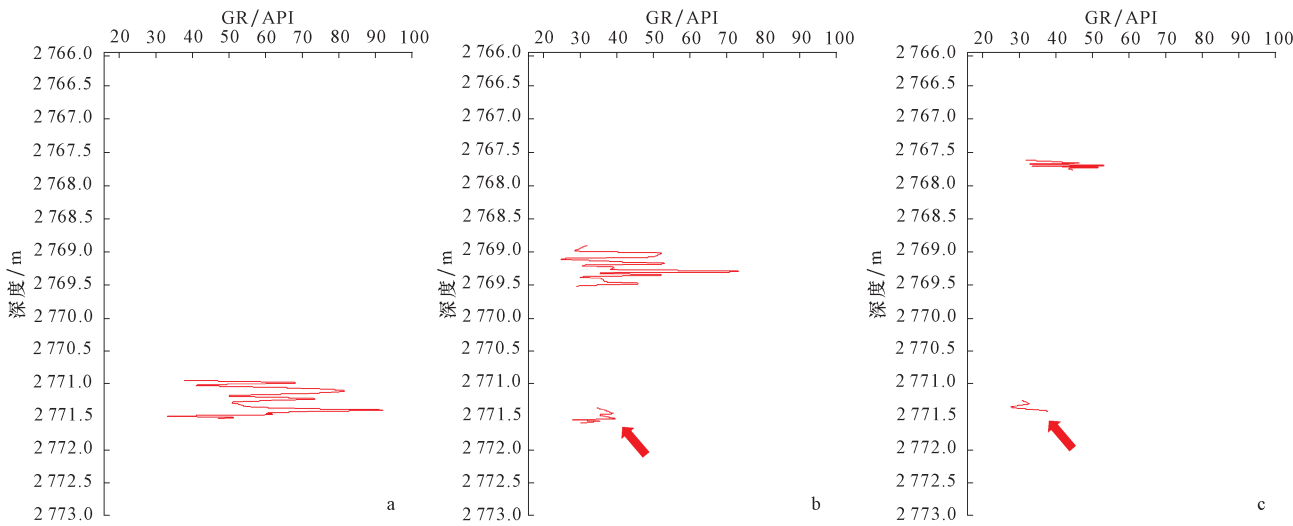


图 2 文中实例第 2、第 3 及第 5 采样点形成的虚拟直井测井曲线
Fig. 2 General view of well logs of the A2, A3 and A5 virtual vertical wells in the example
a. A2 采样点提取的 GR 曲线; b. A3 采样点提取的 GR 曲线; c. A5 采样点提取的 GR 曲线;

表 1 大牛地气田虚拟井样点参数
Table 1 General view of virtual well sampling point parameters in Daniudi gasfield

岩性	井深/ m	井斜/ (°)	方位/ (°)	垂深/ m	南北 位移/m	东西 位移/m	位移/ m	自然 伽马/API	水平段样点 X 坐标/m	水平段样点 Y 坐标/m	水平段样点距 A 靶点位移量/m	备注
黑色煤	3 474	88.79	344.88	2 771.48	919.62	-256.14	954.63	53.64	4 000 095.77	19 000 060.18	339.97	
黑色炭质泥岩	3 475	88.90	344.92	2 771.50	920.58	-256.40	955.63	54.27	4 000 096.73	19 000 059.92	340.97	
黑色炭质泥岩	3 476	89.01	344.96	2 771.52	921.55	-256.66	956.63	54.87	4 000 097.70	19 000 059.66	341.97	
黑色炭质泥岩	3 477	89.12	345.00	2 771.53	922.52	-256.92	957.63	55.47	4 000 098.67	19 000 059.40	342.97	
黑色炭质泥岩	3 478	89.23	345.04	2 771.55	923.48	-257.18	958.63	57.15	4 000 099.63	19 000 059.14	343.97	
黑色炭质泥岩	3 479	89.35	345.09	2 771.56	924.45	-257.44	959.63	64.52	4 000 100.60	19 000 058.88	344.97	
黑色煤	3 480	89.45	345.03	2 771.57	925.41	-257.70	960.63	72.91	4 000 101.56	19 000 058.62	345.97	
黑色煤	3 481	89.56	344.94	2 771.58	926.38	-257.95	961.63	73.49	4 000 102.53	19 000 058.37	346.97	
黑色炭质泥岩	3 482	89.67	344.85	2 771.59	927.35	-258.22	962.63	70.40	4 000 103.50	19 000 058.10	347.97	
黑色炭质泥岩	3 483	89.78	344.75	2 771.59	928.31	-258.48	963.63	65.38	4 000 104.46	19 000 057.84	348.97	
黑色炭质泥岩	3 484	89.88	344.66	2 771.59	929.28	-259.01	964.63	64.26	4 000 105.43	19 000 057.68	349.97	A7 虚拟 井点
黑色炭质泥岩	3 485	89.99	344.56	2 771.60	930.24	-259.27	965.63	64.00	4 000 106.39	19 000 057.31	350.97	
黑色炭质泥岩	3 486	90.10	344.47	2 771.60	931.20	-259.54	966.63	61.75	4 000 107.35	19 000 057.05	351.97	
黑色炭质泥岩	3 487	90.21	344.37	2 771.59	932.17	-259.81	967.63	59.03	4 000 108.42	19 000 056.73	352.97	
黑色炭质泥岩	3 488	90.31	344.28	2 771.59	933.13	-260.08	968.63	57.15	4 000 109.28	19 000 056.51	353.97	
黑色炭质泥岩	3 489	90.44	344.20	2 771.58	934.09	-260.36	969.63	57.03	4 000 110.24	19 000 056.24	354.97	
黑色炭质泥岩	3 490	90.64	344.19	2 771.57	935.05	-260.63	970.63	55.74	4 000 111.20	19 000 055.96	355.97	
黑色炭质泥岩	3 491	90.85	344.18	2 771.56	936.02	-260.90	971.63	53.83	4 000 112.17	19 000 055.69	356.97	
黑色炭质泥岩	3 492	91.06	344.18	2 771.55	936.98	-261.18	972.63	53.64	4 000 113.13	19 000 055.42	357.97	
黑色炭质泥岩	3 493	91.26	344.16	2 771.52	937.97	-261.45	973.63	54.27	4 000 114.09	19 000 055.14	358.97	
黑色炭质泥岩	3 494	91.47	344.16	2 771.50	939.0	-261.35	974.63	54.87	4 000 115.05	19 000 054.87	359.97	

程只是对稀疏处理过的反射系数进行反演处理,因此所得到的结果只体现了主导反射系数的作用,对主导反射系数进行了严格的约束限制^[9-10]。而在此基础上开展的深度域随机模拟使得测井资料的深度域绝对

信息起到了主导作用。对于测井质量较差的直井或测井数据不完整的 A 靶点(水平段起始点)测井、导眼井而言,由于直接参与深度域反演计算,从而完全避免了合成记录标定过程,也就是说完全消除了合成记录标

定误差,对于水平段资料而言也是同样的效果。

可以看出,水平段虚拟直井化深度域岩性随机模拟^[11-15]主要具备以下几个方面的特点。

1) 针对水平段测井资料开展等间隔采样,采样点密度及采样条件不受限制,通常来说采样间隔应大于地震资料采集时的最小道间距。

2) 相比于地震纵向及横向分辨率而言,水平段采样点距离井口南北位移、东西位移及各采样点对应的垂深数据可以认为是准确的,进而采样点投影于地面的XY大地坐标同样可以认为是准确的。

3) 针对各采样点采集并整理前后各一半于采样点间隔距离的数据旨在消除尽可能扩展虚拟井的有效信息,避免单点数据不被采样的问题,同时也可以保证水平段测井数据最大化利用。

4) 将横向分布的测井资料在各样点处形成纵向短测井序列,约束反演时虚拟直井横向上难以得到外推,纵向外推可以得到有效抑制,进而保证反演预测和单砂体顶底构造刻画的准确性。

基于水平井水平段虚拟直井化的深度域约束反演方法通过计算水平段各样点投影于地表的XY坐标,以及通过横向连续的水平段测井数据稀疏提取,将水平段测井数据形成一系列实际并不存在的虚拟直井,进而参与反演计算,不仅保证了水平段测井数据在反演过程中的横向外推作用,同时也实现了水平段随钻过程中测井资料的动态应用,形成预测与调整同步进行的效果。

3 大牛地气田应用效果实例

为进一步说明水平井水平段虚拟直井化深度域岩性随机模拟的技术优势,针对大牛地气田某水平井钻进过程开展储层预测。通过不断添加虚拟直井,刻画单砂体顶底构造及厚度的微小变化,预测与实钻效果吻合度高。图3为该井水平段实钻轨迹及实钻岩性。该井实施过程中一次侧钻时未利用水平段测井资料,二次侧钻钻进350 m内均钻遇目标砂体,继续钻进至475 m后始终为煤层及泥岩。针对该井情况,水平段二次侧钻前600 m侧钻资料每隔50 m设置采样点,采集并整理水平钻井过程中相关测井数据。对得到的采样点XY坐标及距离井口的水平位移量,沿着钻井轨迹方向提取采样点前后各10 m范围内的测井数据,形成一定长度的测井序列(表1)。对所提取的测井数据按照垂深进行从浅到深升序排列,并删除重复的垂深值及其所对应的其他数据,如表1中第11,12,14,15,16,17,18,19,21和22行。

将每个采样点坐标及其所对应的测井数据经过整理,加载到反演软件中相应的虚拟直井处,在平面上形成沿着水平段钻井轨迹均匀分布的一系列虚拟直井;将所得到的一系列虚拟直井进行重采样,目的在于确保每口虚拟直井纵向采样率是相同的,进而和其他真实完钻的直井一起参与到深度域反演计算中。

图4为水平段开钻前导眼井约束反演预测单砂体

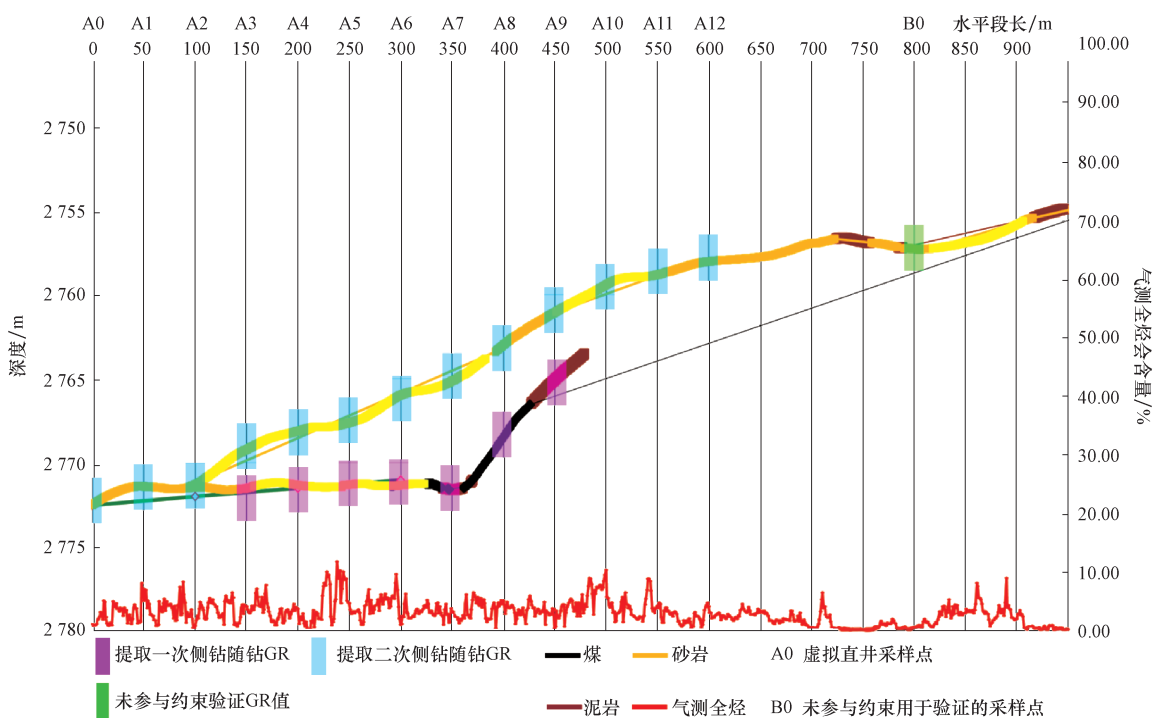


图3 大牛地气田某井水平段实钻及采样点分布

Fig. 3 Distribution of the sampling points and logs of one horizontal well in Daniudi gasfield

空间特征;将一次侧钻水平段数据以虚拟直井的方式约束反演后认为目标砂体在350 m以外的埋藏深度比图3预测深度浅,需要上调轨迹(图5)。

钻井技术人员根据钻井技术相关要求撤回钻头至距A0点100 m处向上调整钻头,二次侧钻时及时应用

水平段资料预测砂体展布,及时增加新的采样点,动态进行深度域随机模拟,直接预测钻头前方目标砂体的埋藏深度及厚度变化情况,指导钻头行进轨迹,二次侧钻1 000 m内全部钻遇目标砂体。B0点为验证样点,实钻岩性及砂体埋深与图6中预测结果有较好的一致性。

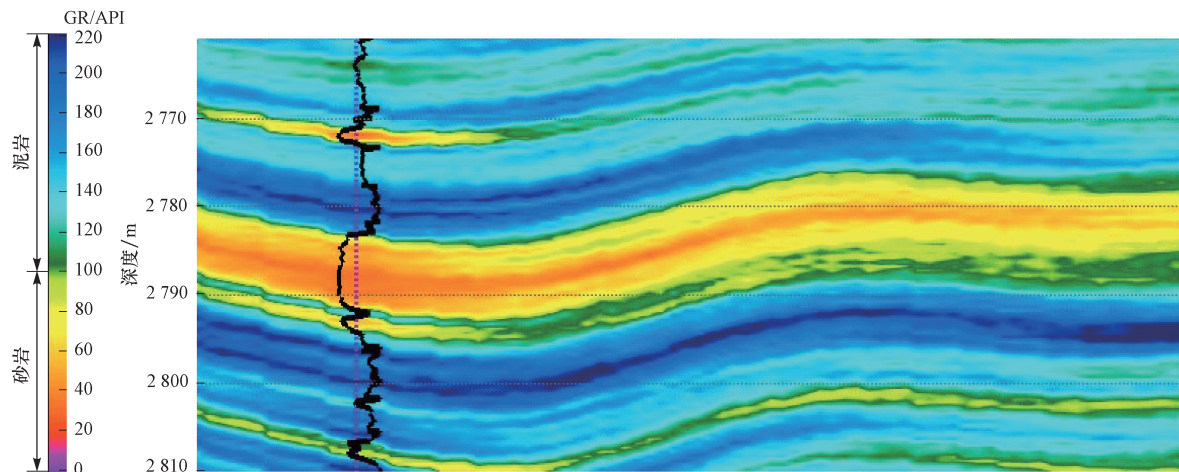


图4 水平段开钻前仅导眼井预测水平段砂体分布

Fig. 4 Sand distribution predicted solely based on the guide well before drilling of lateral

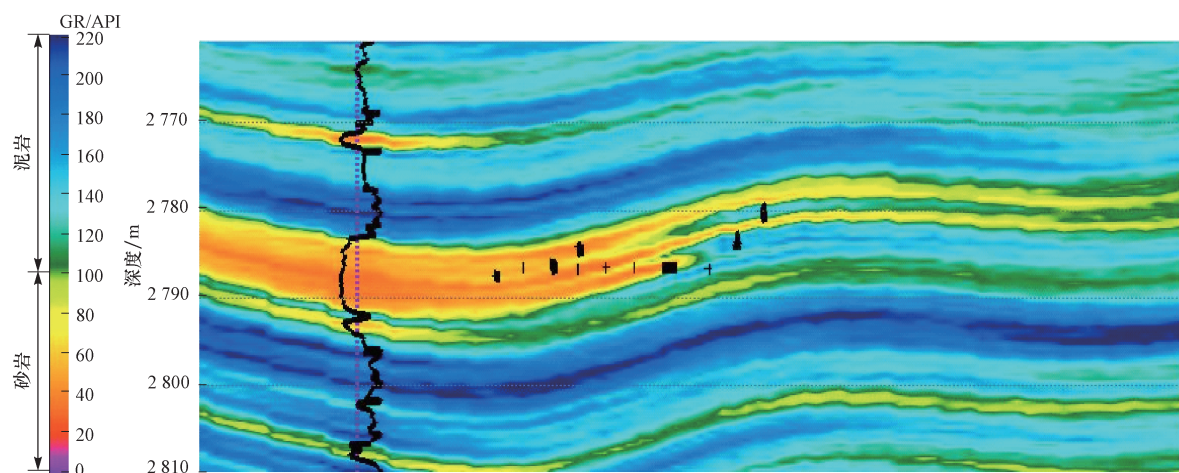


图5 一次钻进及二次钻进前150 m水平段采样点约束

Fig. 5 The first and 150 m sampling points of the second drilling constraint inversion

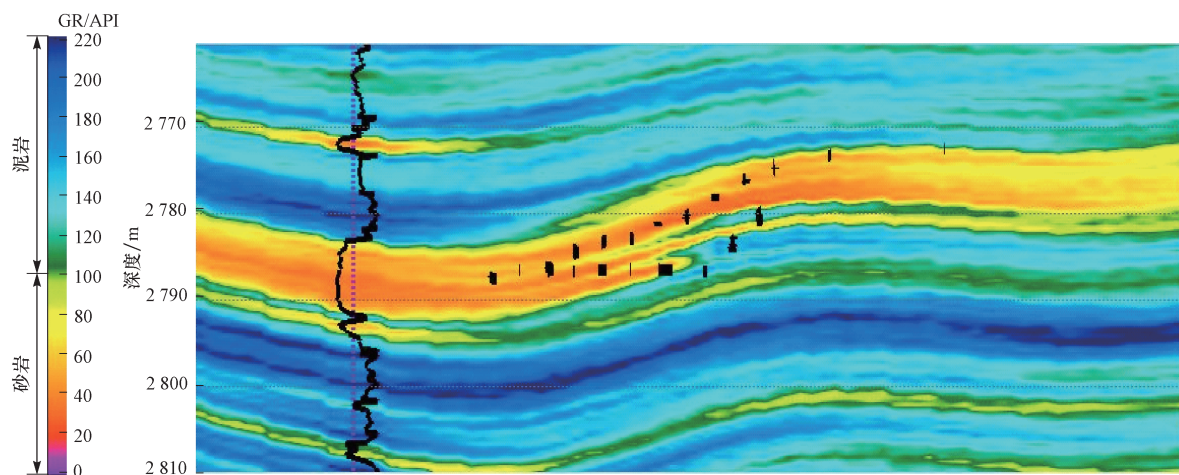


图6 一次钻进及二次钻进前800 m水平段采样点约束

Fig. 6 The first and 800 m sampling points of the second drilling constraint inversion

对比水平段约束前后预测效果可以看出,应用将水平段资料后,目标砂体分布特征和图4中未应用水平段预测的砂体分布在构造及砂体横向变化上有一定的差异,体现了大牛地气田储层横向的强烈非均质性。图4中预测600 m/A12处砂体顶部埋深为2 776 m,底部埋深为2 785 m,实际钻井揭示预测埋深较大。图6中加入水平段测井资料后预测600 m处砂体顶部埋深为2 772 m,底部埋深为2 779 m,更加符合实钻信息。

4 结论

1) 水平段测井资料的应用可以尽可能预测钻头前方单砂体顶底构造及厚度变化,对于复杂油气田水平井轨迹调整具有重大意义。

2) 以虚拟直井的方式结合深度域随机模拟方法应用水平段资料,可以避免反演过程中测井数据纵向外推以及水平段时间深度合成记录标定误差的问题。

3) 随着勘探开发对储层预测精度要求的不断提高,可针对实钻情况任意调整采样点数及其采样间隔。

参 考 文 献

- [1] 郝蜀民,惠宽洋,李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6): 762-768.
Hao Shuming, Xi Kuanyang, Li Liang. Reservoir features of Daniudi low-permeability gas field in Ordos Basin and its exploration and development technologies [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 762-768.
- [2] 李良,袁志祥,惠宽洋,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. 石油与天然气地质, 2000,2(3):268-282.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Xi Kuanyang, et al. Accumulation regularity of upper Paleozoic gas in north Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000,21(3):268-282.
- [3] 卢涛,张吉,李跃刚. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井开发技术及展望[J]. 天然气工业,2013,33(8):38-43.
Lu Tao, Zhang Ji, Li Yuegang. Horizontal well development technology for tight sandstone gas reservoirs in the Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013,33(8):38-43.
- [4] 朱新佳,董建辉,任茵. 苏里格气田苏53-4井区水平井整体部署研究[J]. 天然气勘探与开发,2012,35(2):44-9.
Zhu Xinjia, Dong Jianhui, Ren Yin. Integral deployment of horizontal well in Su53-4 well area of Sulige Gas Field. [J] Natural Gas Exploration and Development, 2012,35(2):44-49.
- [5] 侯瑞云,刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):118-128.
Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(1):118-128.
- [6] 许杰,董宁,朱成宏,等. 致密砂岩地震预测在水平井轨迹设计中的应用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):909-913.
Xu Jie, Dong Ning, Zhu Chenghong, et al. Application of seismic data to the design of horizontal well trajectory in tight sandstone gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(6):909-913.
- [7] 刘宝国. 适用于水平井轨迹设计的深度域随机模拟反演技术[J]. 石油物探,2014,53(1):93-98.
Liu Baoguo. Stochastic stimulation inversion in depth domain for horizontal well trajectory designing [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014,53(1):93-98.
- [8] 凌云,郭建明,郭向宇,等. 油藏描述中的井震时深转换技术研究[J]. 石油物探,2011,50(1):1-13.
Ling Yun, Guo Jianming, Guo Xiangyu, Liu Xing. Research on time-depth conversion by well to seismic in reservoir characterization [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011,50(1):1-13.
- [9] 郭朝斌,杨小波,陈红岳,等. 约束稀疏脉冲反演在储层预测中的应用[J]. 石油物探,2006,45(4):397-400.
Guo Chaobing, Yang Xiaobo, Chen Hongyue. Constrained sparse pulse inversion research in north of Haitongji Depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006,45(4):397-400.
- [10] Wang Q, Guo K. Constrained sparse spike inversion applied in the reservoir prediction [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(1): 35-37.
- [11] 孙思敏,彭仕宓. 地质统计学反演方法及其在薄层砂体预测中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(1):41-48.
Sun Simin, Peng Shibi. Geostatistical inversion method and its application in the prediction of thin reservoirs [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007,22(1):41-48.
- [12] 王香文,刘红,滕彬彬. 地质统计学反演技术在薄储层中的应用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(5):730-735.
Wang Xiangwen, Liu Hong, Teng Bingbing. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction [J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(5):730-735.
- [13] 徐立恒,陈显森,姜岩,等. 不同变差函数变程下随机反演与随机模拟对比分析[J]. 物探与化探,2012,36(2):224-227.
Xu Liheng, Chen Xiansheng, Jiang Yan. A comparative analysis of stochastic inversion and stochastic simulation on different ranges of variograms [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(3):224-227.
- [14] 刘俊州,周小鹰,王箭波. 地质统计学反演在非均质薄砂岩气藏开发中的实践[J]. 内蒙古石油化工,2009(7):16-19.
Liu Junzhou, Zhou Xiaoying, Wang Jianbo. Practices of opening heterogeneous thin sand rock gases deposit in geometry statistic inversion [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(7):16-19.
- [15] 常炳章,王雪敏,李永清. 随机模拟反演技术在泌阳凹陷中南部储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报,2009,31(1):216-219.
Chang Binzhang, Wang Xuemin, Li Yongqing. Application of stochastic simulation and inversion in reservoir prediction in the south of Biyang depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(1):216-219.

(编辑 张玉银)