文章编号:1673-5005(2018)02-0060-11

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2018.02.007

水平井感应测井在精细构造解释中的应用

胡 松¹, 王晓畅¹, 孔强夫¹, 郭洪波²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000)

摘要:以水平井感应测井资料为基础,根据 Maxwell 方程,从感应测井原理入手,建立感应测井三维数值模拟正演算 法,引入阻尼因子,形成马奎特反演算法,利用交互式正反演方法,确定水平井井眼轨迹和地层相互关系,从而达到 利用水平井感应测井曲线进行砂体顶界面反演目的。正演模拟表明:水平井中双感应能够反应的界面距离为2 m; 且地层界面上下地层电阻率数值相差越大,双感应测井对地层界面信息反映越灵敏;当仪器所处地层电阻率比围岩 高,则双感应能够反映的地层界面越远。利用水平井双感应测井资料采样交互式正反演该校正后的构造界面符合 生产情况,弥补了由于地震分辨率不足造成构造界面误差,为油藏精细地质建模提供较为准确的砂体顶界面。

关键词:水平井; 感应测井; 砂体界面; 构造图; 油藏地质建模

中图分类号: P 631.811 文献标志码: A

引用格式:胡松,王晓畅,孔强夫,等.水平井感应测井在精细构造解释中的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):60-70.

HU Song, WANG Xiaochang, KONG Qiangfu, et al. Application of horizontal well induction logging in fine structure interpretation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(2):60-70.

Application of horizontal well induction logging in fine structure interpretation

HU Song¹, WANG Xiaochang¹, KONG Qiangfu¹, GUO Hongbo²

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Tarim Oil Field Branch Company,

PetroChina, Korla 841000, China)

Abstract: This paper uses induction logging data to establish a 3D numerical simulation forward algorithm. Based on Maxwell's equations, the Marquette inversion algorithm can be built by introducing a damping factor. Based on the interactive forward and inversion approach, the correlation of horizontal well trajectory and strata can be determined. Forward modeling results show that the induction logging data can respond to interface distance as small as 2 m in horizontal wells. Thus, the purpose to determine the top and bottom interface of sand body by using induction resistivity of horizontal well can be achieved. The structure interface map calibrated using this method is consistent with the field observation, which suggests the new method can provide an accurate estimate of the top and bottom interfaces of the sand body in complementary to seismic data. **Keywords**; horizontal well; induction logging; formation interface; structure map; reservoir geological modeling

井与井之间砂体界面的确定主要是根据单井上 划分的层界面,运用一定的数学算法插值^[1],或者 以单井确定的地层界面约束地震资料进行层位标 定^[2],然后根据地震资料同相轴追踪形成^[3],进而 形成砂体顶面或底面构造图^[4]。单纯利用单井资 料采用插值算法形成的构造图,由于插值算法不同, 生成的构造面也会有些差别^[5-6]。重磁电方法能够 较好反映构造精度,但其探测深度相对较浅,无法满 足深层油气藏构造界面刻画^[7]。地震资料能够很 好地追踪构造面^[8],也是当前构造面解释最为有效

收稿日期:2017-10-10

的技术手段:然而地震资料由于纵向分辨率的原因. 导致井间砂体界面或多或少存在一些误差,最终造 成解释的构造面也会存在误差。随着勘探程度的不 断提高,勘探技术和手段的进步,水平井的数量增长 较快,它对于提高单井产量和原油采收率[9]非常重 要,是油田高效开发最重要的技术之一^[10]。油田进 行水平井设计和导向时,精细构造图是提高钻井成 功率非常重要的参考资料^[11]。当水平井钻完后,由 于水平井测井资料隐含丰富的地质信息,其携带的 信息是能够用于修正构造面的。利用水平井资料补 充和完善传统井间砂体界面确定方法上存在的不足 或减小地震构造解释存在的误差,对于精细油藏地 质建模有着非常重要的意义。当前水平井测井系列 日趋丰富和完善,对于地层边界探测能力也逐渐增 强^[12].但国内大多水平井主要为电缆测井的常规9 条曲线(绝大多数不包含密度曲线)。在常规曲线 中,电阻率曲线较其他曲线探测深,笔者以双感应测 井为例,从 Maxwell 方程出发^[13],建立双感应三维 数值模拟算法,利用交互式正反演方法[14-15]实现水 平井感应测井确定砂体界面,弥补地震刻画砂体界 面精度上的不足,从而提高精细三维地质建模精度。

1 水平井感应测井数值正演算法

水平井地层,由于地层与井眼不再是轴对称关系^[16],传统二维计算方法不再实用。感应测井中, 发射的电流都是交流电,发射线圈产生的时变电磁 场为时谐电磁场,时间因子可表示为 e^{iot},所以时谐 电磁场的 Maxwell 方程组^[17]为

$\nabla \times E = -i\omega\mu H$,	(1)
$\forall \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{E} + i \omega \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{E} + \boldsymbol{J},$	(2)
$\forall \cdot \boldsymbol{D} = \boldsymbol{\rho},$	(3)
$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$,	(4)
$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = -\mathrm{i}\omega\rho.$	(5)

式中,E 为电场强度,V/m;H 为磁场强度,A/m;D 为电位移矢量, C/m^2 ;B 为磁感应强度,T;J 为发射 电流密度; A/m^2 ; ρ 为电荷密度, C/m^3 ; μ 为磁导率, H/m; ε 为介电常数,F/m; ω 为角频率,rad/s; σ 为 电导率, S/m_o

引入矢量磁位*A*,*B*= ∇×*A*,满足库伦规范 ∇ · *A*=0,由此可得到波动方程。

根据 Maxwell 方程可以知道,空间无源区域,电导率为 $\sigma(x,y,z)$ 的地层中,其电场强度 E 满足波动方程:

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} + k^2 \boldsymbol{E} = -\mathrm{i}\omega \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}.$$

式中,k为传播常数,满足 $k^2 = i\omega\mu\sigma(x,y,z)$,式(6) 右边由发射线圈产生,由于发射线圈的半径相对于 求解空间位置非常小,可以直接将源带入式(6)求 解出三维空间电场强度。采用背景场(E^b)和散射 场(E^s)结合的办法^[18],总场E为

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}^{\mathrm{b}} + \boldsymbol{E}^{\mathrm{s}}.$$
 (7)

式(6)可分解为以下两个方程:

$$\nabla^{2} \boldsymbol{E}^{\mathrm{b}} - (\boldsymbol{\omega}^{2} \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\varepsilon} - \mathrm{i} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{b}}) \boldsymbol{E}^{\mathrm{b}} = -i \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}. \tag{8}$$

$$\nabla^{2} \boldsymbol{E}^{s} + (i\omega\mu\sigma_{r})\boldsymbol{E}^{s} = -i\omega\mu\sigma_{r}\boldsymbol{E}^{b}.$$
(9)

式中, *o*_b 为背景电导率; *o*_r 为扰动电导率。式(8) 可以用解析方法求取,式(9)采用有限元素法^[19] 计 算,得到背景场和散射场大小后,带入式(7)便可求 得整个求解空间电场强度。

2 水平井双感应测井响应分析

依据上述算法思想,用程序语言建立双感应三 维快速数值模拟正演算法,用于考察双感应在水平 井地层中的测井响应。为明确双感应测井能够反映 多远的地层界面以及双感应测井对地层界面的敏感 性,本文中主要分析水平井中双感应测井在地层界 面附件的响应特征以及不同地层厚时的响应特征。

2.1 不同地层厚度响应特征

采用地层模型为上中下三层介质模型^[20],如图 1 所示,上下棕色地层为围岩,中间黄色地层为目的 层(砂岩),仪器(灰色部分)居于目的层中部,与地



Fig. 1 Formation model

层平行,不考虑并眼尺寸及钻井液影响,设砂岩电阻 率 *R*₁ 为 20 Ω · m,厚度 *H* 从 1 m 变化到 20 m,上下 围岩无限厚,围岩电阻率 *R*_s 分别为 1、2、4、6、10、 30、50、100、200 Ω · m,模拟不同地层厚度 *H* 情况下 水平井中双感应测井的响应特征。图 2 为感应测井 随地层厚度变化时的模拟结果。从图 2 可以看出, 当地层厚度 *H* 逐渐增加时,不论围岩是高阻(*R*_s> *R*_t)还是低阻(*R*_s<*R*_t),双感应视电阻率值都逐渐接 近目的层(砂岩)真实值*R*_t;当地层较薄时,双感应 视电阻率偏离目的层真实值,地层越薄,围岩电阻率 与目的层电阻率相差越大,双感应视电阻率偏离目 的层真实值越远,表明地层越薄,受围岩影响越大。 水平井中,通常采用探测深度来描述仪器探测边界 的能力,从图2可以看出,均匀地层中,深感应在地 层厚度大于10 m(图2(a)),中感应在地层厚度大 于8 m(图2(b))时,双感应视电阻率值基本不随围 岩电阻率和地层厚度变化而变化,说明此时双感应 基本不受上下围岩影响,即双感应测井能够反映8 m内地层界面的信息;但按照双感应几何因子80% 贡献率,深感应在地层厚度大于4 m,中感应在地层 厚度大于2 m时,测量结果基本不受上下围岩影响, 即实际测量过程中双感应对2 m内探测到的界面信 息较为可靠。



图 2 不同地层厚度感应测井响应特征

Fig. 2 Dual induction resistivity responding characteristics with different formation thickness

2.2 层界面响应特征

建立两层地层模型,假设地层无限厚,并眼与地 层界面平行,如图 3(a)所示,仪器(图 3(a)灰色部 分)从目的层($R_1 = 20 \ \Omega \cdot m$)逐渐靠近并进入围岩 (围岩电阻率 R_s 分别为1,4,8,30,40 $\Omega \cdot m$)。从图 3 (b)可以看到,当围岩电阻率比较低时(相当于目的 层高阻),从高阻地层逐渐进入低阻地层时,视电阻率 并不是逐渐降低,而是在地层界面(ds)附近先升高后 降低,在界面处形成一个尖角(图3(b), R_s=1Ω·m 黑线);而当围岩电阻率较高时(相当于目的层低 阻),从目的层进入围岩,电阻率逐渐升高,界面处基 本上没有变化(图3(b), R_s=40Ω·m 红线)。







当地层电阻率相对低时(目的层高阻),仪器在 低阻层内(即围岩内)距离地层界面大于1m时,双 感应视电阻率基本接近地层真实值,表明此时双感 应测量值基本不受上覆围岩(目的层)影响(图3 (b),下部),而当目的层电阻率相对较高(围岩低 阻),仪器在目的层内距离地层界面大于4m时,双 感应视电阻率基本接近地层真实值,表明此时双感 应不受下覆围岩影响(图3(b),上部)。以上分析 表明,地层界面上下地层电阻率相差越大,双感应对 地层界面反应越灵敏;仪器所处地层电阻率高于围 岩,仪器能够反应的界面距离越远,反之,能够反应 的界面距离越近。

• 63 •

3 反演算法

双感应实际测量值可以表示为一个 N 维的列 向量 d,同样,地层参数(如地层厚度、地层电阻率、 地层个数等)也可以表示为 M 维的列向量 m,即

$$\boldsymbol{d} = [d_1, d_2, \cdots, d_N]^{\mathrm{T}}, \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{m} = [m_1, m_2, \cdots, m_M]^{\mathrm{T}}.$$
 (11)

此时地层参数 *m* 和测井响应 *y* 的关系表示如下: *y*=*f*(*m*,*d*). (12)

$$\boldsymbol{\Phi} = \sum_{i=1}^{N} |\boldsymbol{f}_i - \boldsymbol{y}_i|^2 < e_p.$$
(13)

其中 e_p 为给定的误差范围,式(13) 等价为求 $\Phi = \sum_{i=1}^{N} f_i^2$ 的极小值,定义函数:

$$\boldsymbol{\Phi} = \frac{1}{2} \boldsymbol{f}(x)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{f}(x). \tag{14}$$

若
$$f$$
在求解区域上可微,即 Φ 对 x 求导:
 $g(x) = Df(x)^{T}f(x) = 0.$ (15)
其中

$$\boldsymbol{D}\boldsymbol{f}(x)^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial y_m}{\partial x_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_n} & \frac{\partial y_2}{\partial x_n} & \cdots & \frac{\partial y_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}.$$

将f(x)在 x_i 点线性展开:

$$f(x) = Df(x^{i})(x-x^{i}) + f(x^{i}).$$
(16)

带入式(15)得到的解记为 x^{i+1} ,则有 $x^{i+1} = x^{i} - [Df(x^{i})^{T}Df(x^{i})]^{-1}Df(x^{i})^{T}f(x^{i}).$ (17) 令 $G(x) = Df(x)^{T}Df(x),将式(15)带入式$ (17),则式(17)可变为

$$x^{i+1} = x^{i} - G(x^{i})^{-1} g(x^{i}).$$
(18)

$$\boldsymbol{w}_i = -\boldsymbol{G}(x^i)^{-1}\boldsymbol{g}(x^i) = -\boldsymbol{G}(x^i)^{-1} \nabla \boldsymbol{\Phi}(x^i), \quad (19)$$

则

$$\boldsymbol{w}_{i}^{\mathrm{T}} \nabla \boldsymbol{\Phi}(x^{i}) = -\boldsymbol{w}_{i}^{\mathrm{T}} \nabla \boldsymbol{\Phi}(x^{i}) \boldsymbol{G}_{i} < 0.$$
(20)

上式表明 w_i 与 – $\nabla \boldsymbol{\Phi}(x^i)$ 方向一致, 为防止 $\boldsymbol{G}(x^i)$ 奇异或病态, 引入一阻尼因子 γ ,

$$\hat{\boldsymbol{G}}(x^i)^{-1} = \boldsymbol{G}(x^k) + \boldsymbol{\gamma}.$$
(21)

当阻尼因子 $\gamma > 0$ 时, $G(x^k)$ 是对称正定矩 阵^[21],因此有

$$\boldsymbol{v}_i(\boldsymbol{\gamma}) = -\boldsymbol{G}(\boldsymbol{x}^i)^{-1} \, \nabla \, \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{x}^i). \tag{22}$$

式(22)即为函数 Φ 在(x^i)处的下降方向。于 是可构造迭代算法,

$$x^{i+1} = x^i - \hat{\boldsymbol{G}}(x^i)^{-1} \,\nabla \boldsymbol{\Phi}(x^i).$$
(23)

式(23)称为阻尼最小二乘法,当 $\gamma>0$ 时,总 $\boldsymbol{\Phi}(x^{i+1})<\boldsymbol{\Phi}(x^{i})$ 可保证,故 $\{x^{i}\}$ 总是收敛的,但当 γ 较大时, $\{x^{i}\}$ 收敛速度下降,而当 γ 太小,则收敛域较小,因此选择合适的 γ 较为困难,通常原则上 γ 的取值应为较小的正数如0.01,然后通过程序自动调节 γ ,确定搜索方向^[19],求响应函数f的解,具体算法如图 4 所示。



Fig. 4 Flow chart of inversion algorithm

为验证反演算法可靠性,以图 3(a)地层模型为 基础,开展两组地层模型反演处理;地层模型中,目 的层电阻率 R,为 1 Ω · m,围岩电阻率 R,为 20 Ω·m;对仪器位于目的层中以及仪器位于围岩 中两种情况进行反演,具体模型参数如表1 所示。

表1	地层界面距离反演模型参数及反演结果
Table 1 I	competion inversion model and inversion result

Table 1 Formation inversion model and inversion result											
模型一	正演深感 应电阻率/ (Ω・m)	正演中感 应电阻率/ (Ω・m)	实际距 离/m	反演距 离/m	绝对误 差/m	模型二	正演深感 应电阻率/ (Ω・m)	正演中感 应电阻率/ (Ω・m)	实际距 离/m	反演距 离/m	绝对误 差/m
R _t =1 Ω · m, R _s =20 Ω · m, 仪器位于 目的层内	9.04	5.78	0.1	0.087	0.013	R ₁ =1Ω·m, R _s =20Ω·m, 仪器位于 围岩内	11.45	7.43	0.2	0.215	-0.015
	5.40	3.22	0.2	0.175	0.025		8.55	7.87	0.5	0.533	-0.033
	3.72	2.21	0.3	0.320	-0.020		8.93	9.77	0.75	0.789	-0.039
	2.88	1.78	0.4	0.450	-0.050		10.02	11.91	1.0	1.040	-0.040
	2.36	1.54	0.5	0.530	-0.030		12.16	14.73	1.5	1.526	-0.026
	1.60	1.22	0.8	0.820	-0.020		14.03	16.51	2.0	2.115	-0.115
	1.38	1.14	1.0	0.963	0.037		16.61	18.33	3.0	3.131	-0.131
	1.14	1.05	1.5	1.480	0.020		17.44	18.80	3.5	3.620	-0.120
	1.05	1.02	2.0	2.132	-0.132		18.05	19.12	4.0	3.850	0.150
2.5 - E 2.0 - SP 超盟運輸 1.5 - N 0.5 - 0 0	0.5	·	- 1.5 3 面距离	 2.0 ds/m		4 町 sp 劇祖理指理影凶 0 0		 2 模型界面距	ر ع الأ		4



模型一,仪器位于低阻目的层内,当地层界面距 离仪器2m时,反演地层界面误差为13.2 cm,误差相 对小于2m距离时较大,由于目的层低阻,能够反应 的界面距离较近,当距离大于2m时,由于反应界面 不灵敏,导致反演结果误差相差较大;模型二,仪器位 于高阻围岩内,当地层界面距离仪器3.5m时,反演 地层界面误差为12 cm,比模型一中2m距离误差还 小,这是由于地层高阻时能够反应的界面距离较远, 这与上文分析一致。图5表明两组模型反演界面距 离与实际模型设定的距离基本都在45°线分布,整体 上误差较小,反演算法可以用于实际资料处理。

(a)模型一

4 地质应用实例

根据以上算法,实际资料处理时,具体步骤如下: (1)水平井大斜度段 TVD 校正;

(2)TVD 校正后的曲线与导眼井或邻井对比, 确定水平井钻遇目的层;

(3)根据曲线特征,将导眼井或邻井目的层段上 下10m(根据仪器探测深度以及轨迹走向和地层的 构造情况调节)地层细分层,并标上砂体界面位置;

(b)模型二

(4)反演确定每一细分层的地层电阻率;

(5)根据地震剖面确定砂体界面的展布情况、 走向等;

(6)调节地层模型和水平井井眼轨迹的相互关系、进出层位置;

(7)反演出砂体界面沿井眼轨迹的走向。

以某油田J区块一口水平井为例。图6为该油 田J区块根据井标定后的地震解释形成的砂体 Ta 顶面构造图,该构造图主要根据地震构造解释得出, 由于解释时并没有考虑到水平井信息,使得解释成 果后,该区有9口水平井在构造面上部,即没有出现 在砂体 Ta 中,而是在上覆泥岩层中穿行,与实际情 况不符合。鉴于该区水平井覆盖率较大,可以充分 利用水平井信息来标定地震解释的井间砂体顶面构 造的展布情况。以其中一口水平井 XX25H 井为例, 说明解释过程。



图 6 砂体 Ta 顶面构造 Fig. 6 Top structure map of Ta

XX25H 井为从南向西北钻探的一口水平井(图 6),按照上述流程,首先进行 TVD 校正,确定该井水 平段钻探主要目的层位。图 7 为水平井大斜度段 TVD 校正后与导眼井对比图(其中,SP 为自然电位 曲线,GR 为伽马曲线,RILD 为深感应电阻率,RILM 为中感应电阻率,RFOC 为微球聚焦电阻率,AC 为 声波时差曲线)。从图 7 可以很明确地看出,该水 平井主要钻探层段为对应导眼井的 4 603.5 ~ 4638.05 m段,即图 7 中蓝色层(层号 4),图 7 左图 第三道为导眼井双感应电阻率和微球聚焦电阻率, 电性曲线上可以很明显看出 4 号砂体为低阻油藏,4 号层电阻率比上覆 3 号泥岩电阻率小,油层电阻率 约为 1 ~ 1.5 Ω · m,导眼井 4 号砂体顶界面 Ta 在 4603.5 m。

为便于反演砂体顶界面,将导眼井砂体顶界面 4603.5 m上下15 m井段地层根据曲线变化,采用 活化函数法^[22]进行分层(该分层目的是为了反演而 细分),分层确定每一小层边界后,结合原始测量曲 线、井眼尺寸及钻井液电阻率,并利用本文中反演算 法对感应电阻率进行反演得到每一细分层的电阻 率,如图8所示,图8第5道台阶状曲线为反演后的 每一细分层的地层电阻率(FRT),每一台阶表示细 分层的界面,第6道为地层模型,颜色深浅表示地层 电阻率高低。据此,完成导眼井地层模型建立,并将 该模型用于水平井作为初始模型。

将上述导眼井建立的地层模型用于水平井,首 先根据测井曲线特征,初步调整地层模型,通过曲线 对比,确定水平井从4723 m进入砂体顶界面 Ta,然 后,根据地震剖面确定地层的大体倾向,最后采用本 文所述反演流程算法,反演出砂体 Ta 顶界面沿井眼 轨迹的走向,图9为最终成果图。图9从上到下,第 1 道蓝色为自然伽马(GR)曲线,橙色为自然电位 (SP)曲线,第2道为深度道,第3道为原始测量深感 应电阻率曲线(蓝色)与正演模拟的深感应电阻率曲 线(RILD_M,红色虚线),第4 道为原始测量中感应电 阻率曲线(蓝色)与正演模拟的中感应电阻率曲线 (RILM_M,红色虚线),第5道为声波时差(AC,蓝色) 曲线和中子(CNL,黑色)曲线,第6道为井眼轨迹和 地层相互关系,红色为实钻井眼轨迹,沿井眼轨迹红 色虑线为双感应有效探测范围,蓝色实线即为反演出 的砂体顶界面 Ta,通过响应特征分析,水平井中感应 测井探测范围为8m,但井筒2m范围内(即井沿井 眼轨迹上下红色虚线框内)的影响最大,故认为2 m 内的反演结果较为可靠,大于2m的层界面主要根据 2 m 内细分层的层界面趋势调整,第3 道和第4 道正 演的双感应曲线是根据井眼轨迹与地层关系,结合实 际测量仪器参数正演得出,正演结果与实测结果基本 一致,说明反演构造界面可靠。





图9第6道黑色实线为在三维地质模型中,沿井 眼轨迹切一条剖面,得到的砂体顶面构造线,该构造

线为地震刻画的砂体顶界线,可以看出与蓝色实线 (反演后的Ta界线)存在较大差别,井眼从4723m接 触到砂体界面开始到水平段结束,地震解释构造线 TVD深度整体要低于反演后的构造线,即地震解释该 井完全在3号泥岩层穿行,然而该井初期日产油86.5 t,显然水平段在砂体里穿行,地震解释结果与实际情 况不符。反演后 Ta 界线与地震解释 Ta 界线 TVD 差如图 10 所示,二者相差 1.5~3.5 m(正数表示反演后的砂体界面 TVD 深度小于地震解释构造线 TVD 深度),这些差异主要是由测井与地震的分辨尺度不同造成的,由于测井的精度要高于地震精度,因此利用该方法反演的砂体界面可靠性较高。



Fig. 9 Inversion results of Ta interface of well XX25H



对研究区其他水平井做相同处理,利用水平 井反演砂体界面约束后的砂体顶界面构造图如图 11 所示,对比图 11 和图 6 发现,整体上,二者的构 造趋势一致,这是由于图 10 反演的基础也是地震 剖面约束的整体走向和倾向,但由于图 11 反演过 程中井间砂体构造面充分利用水平井的测井信 息,因此在局部地方与图 6 存在差别,如图 11 中 A 处、B 处都是分开的,而图 6 相应地方为连续,且 B 处构造形态存在较大差别,图 11 中 C 处为 3 个分 散的小高点,而在图 6 中对应地方为两个大的高 点。反演后,该区原9口水平井全部在层内,由此 可以得出,充分利用水平井测井信息反演后的构 造图可以提高油田精细地质建模精度,为后期开 发方案部署提供坚实依据。



图 11 反演后砂体顶面 Ta 构造 Fig. 11 Ta interface structure map after sand interface inversion

5 结 论

(1)数值模拟结果表明,水平井中双感应测井 能够反映2m内地层界面信息。

(2)地层界面上下地层电阻率数值相差越大, 双感应测井对地层界面信息反应越灵敏;当仪器所 处地层电阻率比围岩高,则双感应能够反应的地层 界面越远。

(3)利用水平井感应测井资料进行构造解释,可以辅助弥补地震由于精度不高造成的误差,为油藏精细地质建模提供更为可靠的参数。

(4)该方法基于砂体横向变化不大的储层,将 砂体界面作为唯一输出反演参数,因此对于油藏内 砂体横向变化大、非均质性强的地区,并不一定实用,但反演思想和流程是可以借鉴的。

(5)水平井测井资料隐含丰富的地质信息,对 于水平井覆盖率较高的地区,本文中所述方法可以 达到精细砂体构造面的目的,然而感应测井探测深 度相对较浅,探测范围外的砂体界面可信度降低。 当前针对随钻电磁波探边仪器研发力度加大,远探 测方位随钻仪器的研制及其解释方法的应用将是水 平井未来发展的重要方向,这将加强水平井测井资 料地质解释应用程度。 **致谢** 感谢中国石化石油勘探开发研究院赵磊 博士的帮助。

参考文献:

- [1] MIALL A D, 孙枢. 沉积盆地分析原理[M]. 北京:石油 工业出版社, 1991:209-243.
- [2] 陆红梅.物探及地质资料在地震解释中的综合应用
 [J].石油大学学报(自然科学版),2002,26(4):23-28.

LU Hongmei. Study on seismic section interpretation with combination of geophysics and geology[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002,26(4):23-28.

- [3] 秦政,朱克安. 用地震叠偏剖面编制构造图的原理及 方法[J]. 石油地球物理勘探,1994,29(1):48-58.
 QIN Zheng, ZHU Kean. Principle and method for making seismic structural map by stacked migration section [J].
 Oil Geophysical Prospecting,1994, 29(1):48-58.
- [4] 袁秉衡,徐礼贵,康南昌,等.石油地震地质学及相关 技术进展[J].石油学报,2013,34(5):580-590.
 YUAN Bingheng, XU Ligui, KANG Nanchang, et al. Related technical advances in petroleum seismogeology
 [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(5): 580-590.
- [5] ДЕНИСОВСБ, 王三乐. 关于构造图绘制精度的评价[J]. 勘探地球物理进展, 2002,25(5):67-69.

· 69 ·

ДЕНИСОВ С Б, WANG Sanle. Evaluation of structural mapping accuracy[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2002,25(5):67-69.

 [6] 刘建芳,季红军,杨彦敏,等.相关分析构造图误差校 正方法应用及效果[J].勘探地球物理进展,2008,31
 (2):143-147.

> LIU Jianfang, JI Hongjun, YANG Yanmin, et al. Correlation analysis structure diagram error correction method and effect [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2008, 31 (2):143-147.

[7] 陈学国,相鹏.山前带重磁电震综合构造建模方法在 准噶尔盆地哈山地区的应用[J].中国石油大学学报 (自然科学版),2017,41(3):65-74.

> CHEN Xueguo, XIANG Peng. Application of gravity, magnetic, electric and seismic comprehensive geologic modeling method for piedmont zone of Hala'alate mountain in Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(3): 65-74.

[8] 刘文岭,朱庆荣,戴晓峰.具有外部漂移的克里金方法
 在绘制构造图中的应用[J].石油物探,2009,44(4):
 404-406.

LIU Wenling, ZHU Qingrong, DAI Xiaofeng. Have external drift of kriging method application in map construction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009,44(4):404-406.

[9] 沈忠厚,黄洪春,高德利.世界钻井技术新进展及发展 趋势分析[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2009,33(4):64-70.

> SHEN Zhonghou, HUANG Hongchun, GAO Deli. Analysis on new development and development trend of word wide drilling technology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2009,33(4):64-70.

- [10] 樊建明,杨子清,李卫兵,等.鄂尔多斯盆地长7 致密 油水平井体积压裂开发效果评价及认识[J].中国石 油大学学报(自然科学版),2015,39(4):103-110.
 FAN Jianming, YANG Ziqing, LI Weibing, et al. Accessment of fracturing treatment of horizontal wells using SRV technique for Chang-7 tight oil reservoir in Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(4):103-110.
- [11] 肖佃师,卢双舫,王海生,等. 三角洲外前缘薄砂体地 震综合预测方法[J].中国石油大学学报(自然科学 版),2015,39(4):62-69.
 XIAO Dianshi, LU Shuangfang, WANG Haisheng, et al. Comprehensive prediction method of seismic to thin

al. Comprehensive prediction method of seismic to thin sandstone reservoir in the delta-frontal [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sci-

ence),2015,39(4):62-69.

- [12] 巫振观,范宜仁,王磊,等.随钻方位电磁波测井仪器 偏心响应模拟及分析[J].中国石油大学学报(自然 科学版),2017,41(5):69-79.
 WU Zhenguan, FAN Yiren, WANG Lei, et al. Numerical modeling and analysis of eccentricity effect on borehole response of azimuthal electromagnetic logging while drilling tool[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(5):69-79.
 - [13] 张庚骥.电测井算法[M].北京:石油工业出版社, 2009:118-131.
 - [14] 胡松,周灿灿,王昌学,等.水平井随钻电阻率数值模 拟分析及应用[J].地质科技情报,2014,33(6):180-186.

HU Song, ZHOU Cancan, WANG Changxue, et al. Characteristics analysis and application of electromagnetic response in horizontal wells [J]. Geological Science and Technology Information,2014,33(6):180-186.

 [15] 胡松,周灿灿,王昌学,等. 泥页岩油气藏水平井评价 对策与实践[J]. 地球物理学进展,2014,38(6):1877-1885.

> HU Song, ZHOU Cancan, WANG Changxue, et al. The strategies and practice of horizontal well evaluation in shale hydrocarbon reservoir [J]. Progress in Geophys, 2014,38(6):1877-1885.

- [16] 周灿灿,王昌学.水平井测井解释技术综述[J].地球物理学进展,2006,21(1):152-160.
 ZHOU Cancan, WANG Changxue. Technology review on the log interpretation of horizontal well [J]. Progress in Geophsics, 2006,21(1):152-160.
- [17] 许巍,柯式镇,姜明,等.随钻双感应测井仪器刻度响应研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014, 38(6):61-66.

XU Wei, KE Shizhen, JIANG Ming, et al. Numerical simulations of calibration of a dual-induction resistivity LWD tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):61-66.

[18] 魏宝君,欧永峰,武杨,等. 柱状成层介质中倾斜线圈 响应的模拟及其在电磁波传播随钻测量中的应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(5): 78-85.

> WEI Baojun, OU Yongfeng, WU Yang, et al. Simulation of tilted coil's response in cylindrically stratified media and its application for electromagnetic propagation measurement while drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(5):78-85.

[19] 刘得军,马中华,苑赫,等. 自适应高阶矢量有限元方

法在随钻电阻率测井中的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(4):78-92.

LIU Dejun, MA Zhonghua, YUAN He, et al. Application of adaptive higher-order vector finite element method to simulate resistivity logging-while-drilling tool response [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(4):78-92.

[20] 胡松,周灿灿,王昌学,等.水平井各向异性地层双感 应测井响应数值模拟[J].科学技术与工程,2014,14 (11):11-15.

> HU Song, ZHOU Cancan, WANG Changxue, et al. Dual induction logging numerical simulation of anisotropic formation in horizontal wells [J]. Science Technology and Engineering, 2014,14(11):11-15.

- [21] 杨韡. 电法测井的快速整体反演及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(2):26-30.
 YANG Wei. Rapid whole inversion and its application in electric well logging [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(2): 26-30.
- [22] 肖波,韩学辉,周开金,等.测井曲线自动分层方法回顾与展望[J].地球物理学进展,2010,25(5):1802-1810.
 XIAO Bo, HAN Xuehui, ZHOU Kaijin, et al. A review and outlook of automatic zonation methods of well log [J]. Progress in Geophys, 2010,25(5):1802-1810.

(编辑 修荣荣)