

储层界面预测模型在水平井地质导向中的应用

张洋洋^{1,2}, 李 黔¹, 吴旭宁¹

(1. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;

2. 中国石化 中原石油工程有限公司, 河南 濮阳 457001)

摘要:目前地质导向模型中储层界面预测方法只适用于较稳定的地层,对于构造变化大的储层预测结果与实际情况存在较大误差,需要对其进行完善。选择适当的邻井,以正北方向为 y 轴建立直角坐标系,在直角坐标系下计算出待钻水平井的多处水平位移和对应储层界面垂深点,将得到的这些点利用曲线拟合的数学方法建立二维储层界面预测模型,它是水平位移与储层界面垂深的二元函数。利用储层界面预测模型判断储层上下倾、计算储层的视倾角并判断钻头与储层界面的相对位置。应用储层界面预测模型对JL区块的一口水平井进行了现场预测,结果表明最终的储层界面预测模型为拟合效果最好的二次函数,拟合度达到了68%;预测出的储层界面垂深与实际垂深基本相吻合;在横向展布上预测的储层界面起伏变化与实际完全一致。研究表明,选择6口邻井数据得到拟合度为68%储层界面预测模型可以满足着陆和导向需要;预测结果的准确度与选择的邻井数呈正相关。研究结果为水平井地质导向钻进提供指导依据,提高钻遇率。

关键词:曲线拟合;地质导向;水平井;储层界面;预测

中图分类号:TE243

文献标识码:A

Application of the reservoir interface prediction model in geosteering of horizontal wells

Zhang Yangyang^{1,2}, Li Qian¹, Wu Xuning¹

(1. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Zhongyuan Petroleum Engineering Inc., SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: Current reservoir interface prediction method of pre-drilling geosteering models works well in prediction of stable formations, but it gives a relatively big error when predicting reservoir interfaces in a complex structural setting. Selecting appropriate adjacent wells and establishing a rectangular coordinate system with north direction as the y axis we calculated the horizontal displacement of the horizontal wells and the corresponding depth of the reservoir interface in the rectangular coordinate system, and built a 2D reservoir interface prediction model by using the mathematical method of curve fitting. This model is a binary function of horizontal displacement and reservoir interface. The reservoir interface prediction model is used to determine reservoir dips and calculate apparent dip angles and the relative displacement between bit and reservoir boundaries. The model is applied to predict a horizontal well in JL block, and the results show that the final reservoir interface prediction model is a quadratic function with a fitting degree of 68%. The predicted vertical depth of reservoir interface basically coincides with the actual vertical depth, and the predicted relief of reservoir interface is consistent with the actual relief on map view. The results show that the reservoir interface prediction model with a fitting degree of 68% built based on the data of 6 adjacent wells can meet the needs of landing and geosteering. The accuracy of the prediction results is positively correlated with the number of adjacent wells chosen. The results can provide guidance for geosteering of horizontal well and effectively keep the horizontal well within the target interval.

Key words: curve fitting, geosteering, horizontal well, reservoir interface, prediction

地质导向是及时引导钻头走向,最大限度地钻遇

油层的一项水平井钻井技术^[1]。水平井地质导向技术

是指在地质研究的基础上,基于随钻测量测井(MWD/LWD)曲线,结合综合录井(钻时、岩屑、荧光)和气测录井资料,对水平井井眼轨迹进行监测和控制的技术^[2-6]。水平井地质导向技术首先建立钻前地质导向模型,并根据评价井的测井资料,对随钻测井(LWD)、录井曲线及可能钻遇的地层岩性进行预测^[7-10]。钻井过程中,在钻前地质导向模型基础上,根据钻井时LWD不同的测井响应和综合录井资料,实时验证构造和储集层信息,不断修正地质导向模型,对靶点深度进行实时预测,及时调整靶点实现水平井的钻井目的^[11]。在LWD基础上发展了以下几种在纵向上实时预测储层界面的方法,例如利用自然伽马预测探测范围与地层界面的距离,利用随钻电阻率探测深度的差异和产生极化角现象来识别井眼轨迹与储层界面的位置关系^[12-14]。在横向展布上通常基于地震资料进行钻前储层界面预测,结合测井资料对地震反演结果加以约束,但分辨率较低^[15]。

在储层界面预测方法中,王谦等人以测井资料为基础,建立井眼轨迹与储层界面在钻进方向上的数学关系^[16]。此方法只适用于全区分布稳定、厚度稳定的储层,不适用于构造变化、波动较大的储层。对于这种缺陷,本文以邻井的测录井资料为基础,借助于曲线拟合的数学方法,建立水平井井眼轨迹的水平位移与储层界面垂深的储层界面预测模型。在实钻过程中结合随钻测录井资料对模型进行实时调整,指导水平井地质导向钻井。

1 储层界面预测模型

1.1 储层界面建模方法

水平井中储层界面预测模型是利用邻井资料建立在水平井钻进方向上的水平位移与垂深的二元方程。在建模中假设储层是连续变化的,不存在断层和地层尖灭等情况。如图1所示, W_1 是待钻水平井井口位置, A 点为入靶点的水平投影点。以 W_1 为出发点建立过 A 点的直线方程。

$$y = x \tan \theta + y_1 - x_1 \tan \theta \quad (1)$$

其中 $\theta = 90^\circ - (\alpha - 180^\circ)$ (2)

式中: α 为 W_1 井井眼轨迹方位角,($^\circ$); θ 为水平井钻进方向与相对东坐标的夹角,($^\circ$); x_1, y_1 分别为入靶点 A 点的坐标,m。

根据邻井资料建立尽可能多的邻井之间的直线方程,如图2所示。其中点 W_2 、点 W_3 、点 W_4 等是已钻

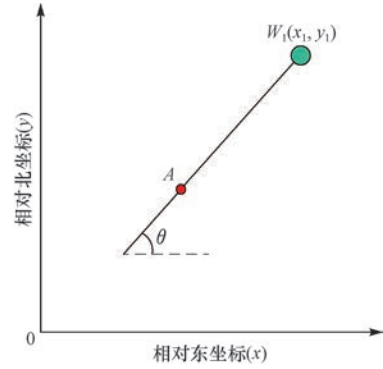


图1 水平井钻进方向水平投影图

Fig. 1 Horizontal projection of horizontal well drilling direction

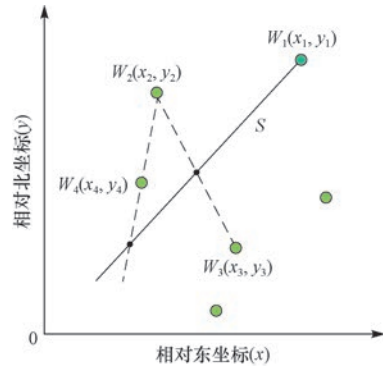


图2 邻井与当前井直线方程示意图

Fig. 2 Linear equation of current well and adjacent wells

邻井目的层位置的水平投影位置,建立两点之间的直线方程。例如建立点 W_2 和点 W_3 之间的直线方程。

$$y = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}(x - x_3) + y_3 \quad (3)$$

联立方程(1)和方程(3)得到交点坐标 (x_0, y_0) :

$$\begin{cases} x_0 = \frac{x_1 \tan \theta - \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} x_3 - y_1 + y_3}{\tan \theta - \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}} \\ y_0 = \left(\frac{x_1 \tan \theta - \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} x_3 - y_1 + y_3}{\tan \theta - \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}} - x_1 \right) \tan \theta + y_1 \end{cases} \quad (4)$$

继而得到 W_1 点与交点 (x_0, y_0) 的水平位移 S :

$$S = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (5)$$

通过邻井目的层的位置计算交点 (x_0, y_0) 处目的层的垂深,以地层下倾为例(图3)。交点处的垂深 H 。

$$H = h_2 + \frac{S_{20}}{S_{23}}(h_3 - h_2) \quad (6)$$

其中

$$S_{20} = \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2} \quad (7)$$

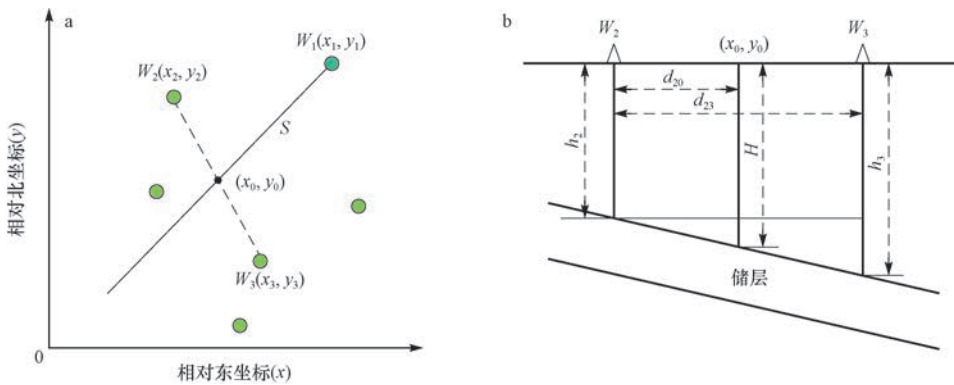


图 3 储层界面垂深计算方法示意图

Fig. 3 Diagram of calculation of reservoir boundary vertical depth

a. 各井水平投影图;b. 垂深计算示意图

表 1 水平位移与对应储层界面垂深数据

Table 1 Data of horizontal displacement and corresponding vertical depth of reservoir interface

水平位移 (S)/m	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
储层上界面 垂深(H)/m	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	

$$S_{23} = \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2} \quad (8)$$

式中: h_2 为点 W_2 处目的层的垂深,m; h_3 为点 W_3 处目的层的垂深,m; S_{20} 为点 W_2 到交点 (x_0, y_0) 的水平距离,m; S_{23} 为点 W_2 与 W_3 之间的水平距离,m。

由此得到在 W_1 钻进方向多个点 (S_i, H_i) , 如表 1 所示, 然后使用曲线拟合方法拟合出储层上界面预测方程 $H(S)$ 。

1.2 曲线拟合方法

使用计算机编程进行曲线拟合不能采用人们手动拟合的方法, 即拟合前首先人为观察这些点比较接近哪种函数然后在使用这种函数进行拟合。使用计算机编程自动拟合是给定计算机多种函数框架, 然后自动拟合, 计算机根据计算出来的拟合度选择最大的那个作为最终的拟合函数模型。本次采用最小二乘法选用一次函数、二次函数、指数函数和双曲函数对同一数据进行拟合。

在科学实验的统计方法研究中, 往往要从一组实验数据 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$ 中, 寻找自变量 x 与因变量 y 之间的函数关系 $y = F(x)$ 。由于观测数据往往不准确, 因此不要求 $y = F(x)$ 经过所有点 (x_i, y_i) , 而只要求在给定点 x_j 上误差 $\delta_i = F(x_i) - y_i (i = 0, 1, \dots, m)$ 按某种标准最小。若记 $\delta = (\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_m)^T$, 就是要求向量 δ 的范数 $\|\delta\|$ 最小。如果用最大范数, 计算

上困难较大, 通常就采用欧式范数 $\|\delta\|_2$ 作为误差度量的标准^[17]。关于最小二乘法的一般提法是: 对给定的一组数据 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$, 要求在函数类 $\varphi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ 中找一个函数 $y = S^*(x)$, 使误差平方和最小, 即

$$\begin{aligned} \|\delta\|_2^2 &= \sum_{i=0}^m \delta_i^2 = \sum_{i=0}^m [S^*(x_i) - y_i]^2 \\ &= \min_{S(x) \in \varphi} \sum_{i=0}^m [S(x_i) - y_i]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$S(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1 + \dots + a_n\varphi_n \quad (n < m) \quad (10)$$

曲线拟合的一般求解方法:

$$(\varphi_j, \varphi_k) = \sum_{i=0}^m \omega(x_i) \varphi_j(x_i) \varphi_k(x_i) \quad (11)$$

$$(f, \varphi_k) = \sum_{i=0}^m \omega(x_i) f(x_i) \varphi_k(x_i) \equiv d_k, k = 0, 1 \dots n \quad (12)$$

可得方程

$$\sum_{j=0}^n (\varphi_k, \varphi_j) a_j = d_k, 0, 1 \dots, n \quad (13)$$

线性方程组称为法方程, 可将其写成矩阵形式

$$Ga = d \quad (14)$$

$$\text{其中 } a = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T \quad (15)$$

$$d = (d_0, d_1, \dots, d_n)^T \quad (16)$$

$$G = \begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & \dots & (\varphi_0, \varphi_n) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & \dots & (\varphi_1, \varphi_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\varphi_n, \varphi_0) & (\varphi_n, \varphi_1) & \dots & (\varphi_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

1) 对于一次函数, 令 $S_1(x) = a_0 + a_1x$, 这里 $n = 1$, $\varphi_0(x) = 1, \varphi_1(x) = x$, 故

$$(\varphi_0, \varphi_0) = \sum_{i=0}^m \omega_i \quad (18)$$

$$(\varphi_0, \varphi_1) = (\varphi_1, \varphi_0) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i \quad (19)$$

$$(\varphi_1, \varphi_1) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i^2 \quad (20)$$

$$(\varphi_0, f) = \sum_{i=0}^m \omega_i f_i \quad (21)$$

$$(\varphi_0, f) = \sum_{i=0}^m \omega_i f_i \quad (22)$$

由法方程(13)得线性方程组

$$\begin{cases} (\varphi_0, \varphi_0) a_0 + (\varphi_0, \varphi_1) a_1 = (\varphi_0, f) \\ (\varphi_1, \varphi_0) a_0 + (\varphi_1, \varphi_1) a_1 = (\varphi_1, f) \end{cases} \quad (23)$$

解出 a_0, a_1 , 便可得到所求的拟合曲线为

$$S_1^*(x) = a_0 + a_1 x \quad (24)$$

2) 对于二次函数, 令 $S_1(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, n = 2, \varphi_0(x) = 1, \varphi_1(x) = x, \varphi_2(x) = x^2$, 故

$$(\varphi_0, \varphi_0) = \sum_{i=0}^m \omega_i \quad (25)$$

$$(\varphi_0, \varphi_1) = (\varphi_1, \varphi_0) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i \quad (26)$$

$$(\varphi_0, \varphi_2) = (\varphi_2, \varphi_0) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i^2 \quad (27)$$

$$(\varphi_1, \varphi_1) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i^2 \quad (28)$$

$$(\varphi_1, \varphi_2) = (\varphi_2, \varphi_1) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i^3 \quad (29)$$

$$(\varphi_2, \varphi_2) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i^4 \quad (30)$$

$$(\varphi_0, f) = \sum_{i=0}^m \omega_i f_i \quad (31)$$

$$(\varphi_1, f) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i f_i \quad (32)$$

$$(\varphi_2, f) = \sum_{i=0}^m \omega_i x_i^2 f_i \quad (33)$$

由法方程(13)得线性方程组

$$\begin{cases} (\varphi_0, \varphi_0) a_0 + (\varphi_0, \varphi_1) a_1 + (\varphi_0, \varphi_2) a_2 = (\varphi_0, f) \\ (\varphi_1, \varphi_0) a_0 + (\varphi_1, \varphi_1) a_1 + (\varphi_1, \varphi_2) a_2 = (\varphi_1, f) \\ (\varphi_2, \varphi_0) a_0 + (\varphi_2, \varphi_1) a_1 + (\varphi_2, \varphi_2) a_2 = (\varphi_2, f) \end{cases} \quad (34)$$

解出 a_0, a_1, a_2 , 便可得到所求的拟合曲线为

$$S_1^*(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (35)$$

3) 对于指数函数, 根据给定数据 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$, 通过描图确定的拟合曲线方程为指数形式, 即 $y = ae^{bx}$, 可通过恒等变换使其成为线性形式。两边

取对数, 得 $\ln y = \ln a + bx$ 。若令 $\bar{y} = \ln y, A = \ln a$, 则得 $\bar{y} = A + bx, \varphi = (1, x)$ 。为确定 A, b , 先将 (x_i, y_i) 转化为 $(x_i, \bar{y}_i)$ 。

根据最小二乘法, 可按一次函数的拟合方法, 构造线性方程组, 解出 A, b , 则 $a = e^A$ 。于是便得到最小二乘拟合曲线

$$y = ae^{bx} \quad (36)$$

需要注意的是若拟合曲线的指数形式为 $y = e^{a+bx}$, 也可通过恒等变换使其成为线性形式。两边取对数, 得 $\ln y = a + bx$, 令 $\bar{y} = \ln y$, 按上述步骤计算 a, b , 即可得到所要求的拟合曲线。

4) 对于双曲函数, 假设 $y = F(x)$ 是双曲线型 $\frac{1}{y} = a + \frac{b}{x}$, 即 $y = \frac{x}{ax+b}$ 。为了确定 a, b , 令 $\bar{y} = \frac{1}{y}, \bar{x} = \frac{1}{x}$, 于是可用 $\bar{x}$ 的线性函数 $S_1(\bar{x}) = a_0 + a_1 \bar{x}$ 拟合数据 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i) (i = 0, 1, \dots, m)$, $\bar{x}_i, \bar{y}_i$ 由原始数据 (x_i, y_i) 根据变换计算出来。求解过程与之前介绍的方法类似, 根据法方程构造线性方程组后解出 a_0, a_1 的值, 便可得到所求的拟合曲线方程。

为了定量的评价拟合的曲线与实际情况之间存在的误差大小, 用拟合度的大小来表示拟合的情况。其中拟合度可用离差平方和来确定, 即

$$Q_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - \bar{z})^2 = Q_{\text{剩}} + Q_{\text{拟}} \quad (37)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为实际值的总离差平方和; z_i 为实际值; $\bar{z}$ 为实际值的平均值; $\hat{z}_i$ 为拟合值; $Q_{\text{剩}}$ 为实际值与拟合值之差的平方和; $Q_{\text{拟}}$ 为拟合值与实际值的平均值之差的平方和。

用 $Q_{\text{拟}}$ 在 $Q_{\text{总}}$ 中所占的百分比来定义拟合度, 即拟合度 C 为:

$$C = \sqrt{Q_{\text{拟}}/Q_{\text{总}}} = \sqrt{(1 - Q_{\text{剩}}/Q_{\text{总}})} \times 100\% \quad (38)$$

其中 $S(x_i)$ 表示拟合的曲线各点的值, y_i 表示原始数据各点的值。

对不同函数拟合的曲线比较误差的大小, 选择误差最小的拟合曲线作为最终的储层界面预测方程。

2 储层界面预测方程在地质导向中的应用

2.1 判断地层上、下倾及倾角大小

在钻遇目的层后需要确定储层界面的上倾、下倾

情况及视倾角大小,才能更好的指导在储层中的钻进。利用储层界面预测方程能很好的进行定量判断。为了方便计算,垂深取负值,对储层界面预测方程进行求得得到 $H'(S)$ 。

1) 当 $H'(S) > 0$ 时,地层上倾,在钻进过程中应适当的增大井斜角,防止从储层底部钻出。

2) 假设 $H'(S) < 0$,地层下倾,在钻进过程中应适当的减小井斜角,防止从储层顶部钻出。

3) 假设 $H'(S) = 0$,地层水平,在钻进过程中应保持水平钻进。

在地质导向钻井中提前知道地层倾角的大小,适当的调整井斜角,可以很大程度的提高钻遇率。利用储层界面预测方程计算地层倾角,地层视倾角计算公式为:

$$\theta_0 = \arctan |H'(S)| \quad (39)$$

确定了储层的视倾角就能更加准确的认识储层具体的展布情况,为地质建模提供可靠的依据。在实钻过程中,还要根据实时随钻测录井资料计算地层倾角并对地质模型中的倾角进行校正。

2.2 判断井眼轨迹与储层界面相对位置

在实钻过程中要不断的提前预测钻头与储层的相对位置关系,其中利用储层界面预测方程可以计算其相对位置关系,见下式。

$$\Delta H = H_{\text{bit}} - H(S) \quad (40)$$

式中: ΔH 为钻头与储层界面的相对深度差,m; H_{bit} 为实钻过程中钻头所在位置的垂深,m; $H(S)$ 为钻头所在位置的水平位移 S 处的储层界面方程预测垂深,m。

当 $\Delta H > 0$ 时,此时钻头还未钻达储层,在储层之上;当 $\Delta H < 0$ 时,此时钻头已钻达储层,在储层上界面以下;当 $\Delta H = 0$ 时,此时刚钻达储层,在储层上界面处。

在初步判断钻头与储层界面的相对位置后还需要根据随钻测录井数据对储层界面预测方程进行校正,才能更加精确判断。

1) 假设实钻中钻头未钻遇储层上界面

当 $H_{\text{bit}} < H(S)$ 时,钻头的垂深小于储层界面预测垂深,说明预测较准确,暂时不用进行校正,利用式(36)计算距离储层上界面的距离。

当 $H_{\text{bit}} \geq H(S)$ 时,钻头的垂深大于等于储层界面预测垂深,但是实钻中并未钻达储层,说明储层界面预测方程和实际情况有一定的差异,需要对垂深进行校正,应该增大储层界面预测垂深。

2) 假设实钻中钻头钻遇储层上界面

当 $H_{\text{bit}} < H(S)$ 时,钻头的垂深小于储层界面预测

垂深,但是实钻中已经钻遇到了储层上界面,说明储层界面预测方程和实际情况有一定的差异,需要对垂深进行校正,应该根据随钻测录井数据对储层界面的垂深进行标定,相应的减小储层界面预测方程的垂深。

当 $H_{\text{bit}} = H(S)$ 时,钻头的垂深等于储层界面预测垂深,说明储层界面预测方程和实际地层情况相符,不需要进行校正。

当 $H_{\text{bit}} > H(S)$ 时,钻头的垂深大于储层界面预测垂深,说明储层界面预测方程的垂深较小,应该根据随钻测录井数据对储层界面的垂深进行标定,相应的增加储层界面预测方程的垂深。

3 应用实例

选取构造变化较大的 JL 区块的 6 口已钻直井 JL-1 至 JL-6 作为邻井,以待钻井水平井 JLHW224 (钻进方位 56°) 的井口坐标为原点,正北方向为 Y 轴建立直角坐标系。6 口邻井的目的层大地坐标转化成相对坐标见下表 2。

根据上文的储层建模方法计算出水平井 JL-7H 在钻进方向上水平位移与储层界面垂深见表 3。

使用常用的一次函数、二次函数、指数函数和双曲函数对以上数据进行曲线拟合,并且计算比较各类函数拟合的拟合度的大小,选出拟合度最大的拟合函数作为储层界面预测模型。为了方便计算储层界面垂深取负值。

其拟合度计算结果如下。

一次函数: $H(S) = 0.011\ 7S - 3\ 575.92$,拟合度 $C = 43\%$;

二次函数: $H(S) = -0.002\ 27S^2 + 1.92S - 394\ 3.61$,拟合度 $C = 68\%$;

指数函数: $H(S) = -3\ 575.92e^{-3.37 \times 10^{-6}S}$,拟合度 $C = 26\%$;

双曲函数: $H(S) = \frac{S}{-0.000\ 282S + 0.000\ 832}$,拟合度 $C = 27\%$ 。

表 2 6 口邻井相对坐标及垂深数据
Table 2 Relative coordinates and vertical depths of six adjacent wells

井号	JL-1	JL-2	JL-3	JL-4	JL-5	JL-6
x/m	104	256	306	249	475	651
y/m	216	297	510	87	138	214
垂深/m	3 600	3 530	3 620	3 610	3 500	3 640

表3 水平井 JLHW224H 水平位移与储层界面垂深计算数据

Table 3 Calculated horizontal displacements and vertical depths of reservoir boundary in horizontal well JLHW224H

水平位移 (S)/m	238	302	325	416	480	496	609
储层界面 垂深(H)/m	3 606	3 591	3 559	3 520	3 558	3 546	3 618

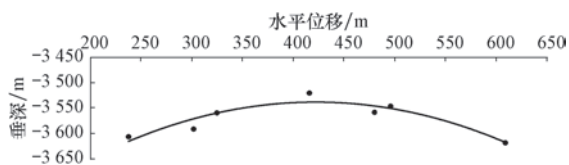


图4 储层界面预测模型曲线拟合图

Fig. 4 Curve fitting diagram of the reservoir interface prediction model

经比较二次函数拟合的误差最小以及拟合度最高,拟合效果最好,因此选择二次函数类型的拟合曲线,拟合结果如图4所示。

对求得的储层界面预测模型函数进行求导得 $H'(S) = -0.00457S + 1.92$, 容易得到当 $S < 420$ m 时 $H'(S) > 0$, 即在水平位移小于 420 m 时储层上倾, 最大倾角在 25° 左右, 在地质导向造斜段不适合着陆入靶, 应选择储层界面倾角在 10° 以内的位置进行着陆, 即在水平位移 $S > 382$ m 的位置适合着陆。当 $S > 420$ m 时 $H'(S) < 0$, 即在水平位移大于 420 m 时储层下倾。

由于只选用 6 口邻井得到的点比较少, 所以最终最高的拟合度只有 68%, 如果有足够多的邻井可以得到足够多的点就可以进一步提高拟合度。与水平井 JLHW224 实钻后对比发现储层界面预测模型预测出的储层界面垂深与实际垂深基本相吻合, 并且随钻过程中及时的进行校正可以有效的消除这种误差。在横向上展布上预测的储层起伏变化与实际完全一致, 说明拟合度达到 68% 可以满足着陆和导向需要。

4 结论

1) 根据多口邻井的储层地质特征资料建立了二维储层界面预测方程, 它是储层界面垂深和水平位移的二元函数。此方法不仅适用于储层地质特征分布稳定的情况, 而且对于构造变化较大、地层倾角变化较大的储层也适用。

2) 储层界面预测建模采用最小二乘法曲线拟合的方法, 使用常用的 4 种函数对同一数据进行拟合, 对各类型的函数所拟合出来的曲线对比各自的拟合度,

优选出拟合度最高的拟合曲线作为最终的层次界面预测模型。

3) 在地质导向钻进中利用储层界面预测方程判断地层上、下倾以及在钻进方向上视倾角的大小, 预测储层相对深度为地质导向安全准确着陆提供依据。

4) 要尽可能使用更多的邻井数据, 预测结果的准确程度和邻井数呈正相关, 使用的邻井越多最终的拟合度越高, 预测精度越高; 经现场验证该方法建立的储层界面预测模型可以为着陆和导向提高依据, 提高钻遇率。

参 考 文 献

- [1] 孙金浩. 水平井地质导向及解释技术研究及应用[J]. 国外测井技术, 2010, 2010(4): 14-19.
Sun Jinhao. geosteering research and application about horizontal well [J]. World Well Logging Technology, 2010, 2010(4): 14-19.
- [2] 朱卫星, 杨玉卿, 赵永生, 等. 测井地震联合反演在地质导向风险控制中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(S1): 181-185.
Zhu Weixing, Yang Yuqing, Zhao Yongsheng, et al. Joint inversion of logging and seismic data for geosteering risk control [J]. Oil Geophysical Prospection, 2013, 48(S1): 181-185.
- [3] 杨少虎, 朱卫星, 杨玉卿, 等. 测井地震联合建模方法在地质导向前导模型中的应用[J]. 海洋石油, 2012, 32(2): 82-86.
Yang Shaohu, Zhu Weixing, Yang Yuqing, et al. The method of log and seismic combined modeling used in the geosteering pre-modeling [J]. Offshore Oil, 2012, 32(2): 82-86.
- [4] 高永德, 陈鸣, 蔡建荣, 等. 基于地层边界探测的主动型地质导向技术在南海西部复杂油层中的应用[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 63-69.
Gao Yongde, Chen Ming, Cai Jianrong, et al. An application of the active geosteering technology based on stratigraphic-boundary detection in complex reservoirs in the western South China sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 63-69.
- [5] 王中雪. 三维地质导向系统研发与应用[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 57-59.
Wang Zhongxue. R & D of 3D geosteering System [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(4): 57-59.
- [6] 朱卫星, 杨玉卿, 赵永生, 等. 基于随钻动态地震反演的地质导向技术及其应用[J]. 中国海上油气, 2015, 27(6): 27-30.
Zhu Weixing, Yang Yuqing, Zhao Yongsheng, et al. Geosteering technology based on dynamic inversion while drilling and its application [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(6): 27-30.
- [7] 唐钦锡. 水平井地质导向技术在苏里格气田开发中的应用——以苏 10 和苏 53 区块为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 388-393.
Tang Qinxin. Application of geosteering technology in the development of Sulige gas field—case studies of the Su10 and Su53 blocks [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 388-393.
- [8] 赵勇. 页岩气水平井地质导向技术研究与应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2015, 28(2): 6-8.

- Zhao Yong. Research and application of horizontal well geosteering technology in shale gas field[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(2): 6-8.
- [9] 张德军. 页岩气水平井地质导向钻井技术及其应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 7-10.
- Zhang Dejun. Geosteering drilling technology and its application in shale gas horizontal well[J]. Drilling & Production technology, 2015, 38(4): 7-10.
- [10] 王理斌, 段余东, 钟伟, 等. 地质建模在苏丹大位移水平井地质导向中的应用[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 90-92.
- Wang Libin, Duan Xianyu, Zhong Wei, et al. Application of geological modeling to geosteering in Sudan extended-reach horizontal wells[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 90-92.
- [11] 亢武臣, 林楠, 聂同建. 地质导向矢量角及在地层边界探测中的作用[J]. 录井工程, 2013, 24(2): 41-43.
- Kang Wuchen, Lin Nan, Nie Tongjian, et al. Geosteering vectorial angle and its role in detecting formation boundary[J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24(2): 41-43.
- [12] 秦宗超, 刘迎贵, 邢维奇, 等. 水平井地质导向技术在复杂河流相油田中的应用——以曹妃甸 11-1 油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 378-382.
- Qin Zongchao, Liu Yinggui, Xing Weiqi, et al. Application of Geosteering technique of horizontal well in complex fluvial reservoir—A case from Caofeidian 11-1 oilfield[J]. Petroleum Exploration And Development, 2006, 33(3): 378-382.
- [13] 卢志远. 水平井储层界面预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
- Lu Zhiyuan. Research on prediction of reservoir interface in horizontal well[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009.
- [14] 史晓锋. 水平井中随钻电阻率测量仪定位和预测地层界面的方法[J]. 测井技术, 2006, 30(2): 119-121.
- Shi Xiaofeng. Methods for orientation of formation layerings and formation boundary prediction with LWD resistivity logs in HZ wells[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(2): 119-121.
- [15] 向长生, 王智锋, 亢武臣. 随钻自然伽马地层边界模型分析[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 112-114.
- Xiang Changsheng, Wang Zhifeng, Kang Wuchen. Modeling and analysis of formation boundaries based on LWD natural gamma[J]. Oil Drilling & Production technology, 2013, 35(1): 112-114.
- [16] 王谦, 李国利, 李震, 等. 地质导向中二维储层界面预测方法研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 87-95.
- Wang Qian, Li Guoli, Li Zhen, et al. A method to predict 2D reservoir interfaces in Geosteering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 87-95.
- [17] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 73-74.
- Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 73-74.

(编辑 张亚雄)

(上接第 601 页)

- [27] 余焯, 张昌民, 李少华, 等. 惠州凹陷珠江组泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 40-49.
- Yu Ye, Zhang Changmin, Li Shaohua, et al. Geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Zhujiang formation of Huizhou depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(1): 40-49.
- [28] McLennan SM. Weathering and global denudation[J]. Journal of Geology, 1993, 101: 295-303.
- [29] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 11-13.
- Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 11-13.
- [30] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299: 715-717.
- [31] 莱尔曼. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 184-236.
- Lerman A. Lakes chemistry geology physics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 184-236.
- [32] Rimmer S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA) [J]. Chem Geol, 2004, 206: 373-391.
- [33] 许恩爱, 王庆魁, 张家良. 黄骅坳陷孔南地区膏泥岩层段岩性油藏成藏特点[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 37-43.
- Xu Enai, Wang Qingkui, Zhang Jialiang. Characteristics of lithological reservoirs in gypsiferous mudstone formation in Kongnan area, Huanghua Depression[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(4): 37-43.
- [34] 郭铁, 谢淑云, 张殿伟, 等. 川南地区灯影组白云岩地球化学特征及流体来源[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 721-730.
- Wu Tie, Xie Shuyun, Zhang Dianwei, et al. Geochemical characteristics and fluid origin of the Dengying Formation dolomites in southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 721-730.
- [35] Russell A D, Morford J L. The behavior of redox-sensitive metals across a laminated-massive-laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia[J]. Mar Geol, 2001, 174: 341-354.
- [36] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the upper pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [37] 刘邦, 潘校华, 万仑坤, 等. 东尼日尔盆地海侵的微体古生物和地球化学证据[J]. 现代地质, 2011, 25(5): 995-1006.
- Liu Bang, Pan Xiaohua, Wan Lunkun, et al. Marine transgression of the eastern Niger basin in the late Cretaceous Paleontological and geochemical evidences[J]. Geoscience, 2011, 25(5): 995-1006.

(编辑 张玉银)