

文章编号:1673-5005(2021)02-0071-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.008

双水平井斜井段导向钻井快速磁测距计算方法

刁斌斌,高德利,穆凡,张森

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:双水平井是高效开发重油、油砂和天然气水合物等非常规油气资源的先进井型,具有广阔的应用前景。双水平井斜井段的邻井距离精确测量和精细控制,有助于提高应用蒸汽辅助重力泄油技术开发非常规油气资源的效果。根据 TSP-RMRS(two sensor packages-rotating magnet ranging system)的工作原理,以适用于双水平井水平井段的 TSP-RMRS 测距算法为基础,提出考虑会聚角和异面夹角影响的 TSP-RMRS 测距算法。通过模拟试验,分析磁短节到两组传感器的轴向距离、会聚角和异面夹角对计算结果的影响。结果表明:当磁短节到两组传感器的轴向距离同时小于等于两组传感器的间距时,磁短节不需要随钻头钻进一定距离,应用 TSP-RMRS 就可以快速实现双水平井斜井段邻井距离的精确测量。

关键词:蒸汽辅助重力泄油;双水平井;斜井段;邻井距离;磁导向

中图分类号:TE 21 **文献标志码:**A

引用格式:刁斌斌,高德利,穆凡,等.双水平井斜井段导向钻井快速磁测距计算方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(2):71-77.

DIAO Binbin, GAO Deli, MU Fan, et al. A fast magnetic-ranging calculation method for steerable drilling in bulid-up section of twin parallel horizontal wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 71-77.

A fast magnetic-ranging calculation method for steerable drilling in bulid-up section of twin parallel horizontal wells

DIAO Binbin, GAO Deli, MU Fan, ZHANG Sen

(Key Laboratory for Petroleum Engineering of Ministry of Education in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The pattern of twin parallel horizontal wells is an advanced well type for the efficient development of unconventional oil and gas resources such as heavy oil, oil sands and natural gas hydrates, and has broad application prospective. Accurate measurement and fine control of the adjacent well distance of the twin parallel horizontal wells are essential for the effective application of the steam-assisted gravity drainage (SAGD) technique to develop unconventional oil and gas resources. In this study, based on the principle of the two sensor packages-rotating magnet-ranging system (TSP-RMRS), a TSP-RMRS ranging algorithm considering the influence of convergence angle and off-angle angle was proposed, and the influence of the axial distance, the convergence angle and the angle of the different faces on the calculation results of the well distance was analyzed. The results show that, when the axial distances between the magnetic sub and the two sensor packages are less than or equal to the distance between the two sensor packages and the magnetic sub does not drill a certain distance with the drill bit, accurate measurements of adjacent well distance in the build-up sections of the SAGD wells can be achieved quickly by using the TSP-RMRS calculation method.

Keywords: SAGD; twin parallel horizontal wells; build-up section; adjacent well distance; magnetic-ranging

蒸汽辅助重力泄油(SAGD)双水平井技术由 Butler 和 Stephens^[1]提出以来,已在重油和油砂的开

发中得到了广泛应用,同时在未来天然气水合物的高效开发中也具有潜在的应用前景。目前,SAGD双水井钻井技术在中国辽河油田和新疆风城油田等重油开发矿场试验中效果显著^[2-5]。但是现场实践中发现,仅在注入井水平井段使用磁导向钻井技术,仍难保障整个水平井段的邻井距离都达到设计要求,亟需在注入井斜井段实现磁导向钻井^[6]。目前,可以用于引导注入井沿生产井平行钻进的工具主要是MGT(magnetic guidance tool)^[7-8]和RMRS(rotating magnet ranging system)^[8-9]。中国对该类工具的研究起步较晚,特别是研发的基于旋转磁场随钻测量的测距导向技术已在钻井现场取得应用实效^[10-14]。为了实现在注入井斜井段实现磁导向钻井,研究者提出了考虑会聚角和异面夹角影响的RMRS测距算法^[15]。然而,该方法需要磁短节随钻头钻进一段距离才能得到正钻井到已钻井的距离和方向,需要钻进的距离随邻井距离的增加而增加,不仅增加了钻井周期,而且钻进方向的改变和磁短节井下位置的记录误差也会影响计算结果的精度。针对以上问题,笔者以TSP-RMRS^[16]用于双水平井水平井段测距算法为基础,进一步探讨考虑会聚角和异面夹角的TSP-RMRS测距算法,以实现双水平井斜井段空间相对位置的快速测量。

1 TSP-RMRS 的工作原理

与RMRS的硬件组成相似,TSP-RMRS的硬件也主要由磁短节、探管、接口箱和计算机组成。如图1所示,与RMRS不同的是,TSP-RMRS探管的内部有两个三轴交变磁场传感器、一个三轴重力加速度传感器,其中一个三轴交变磁场传感器靠近探管的止端,另一个三轴交变磁场传感器和三轴重力加速度传感器靠近探管的接线端,而且两个交变磁场传感器之间相隔一定的距离 d ^[16]。如图2所示,测量时,磁短节直接与钻头相连,在注入井中随钻头的旋转而旋转,但是不需要沿井眼延伸方向移动;探管由井下牵引器或修井油管等下入预先钻好的生产井中,主要作用是探测井下的地磁场、重力场、温度和由磁短节旋转产生的两组交变磁场感应强度三轴分量数据,并将记录的数据通过电缆传输到地面的接口箱,进而传输到计算机中安装的测距导向计算软件,计算注入井与生产井的空间相对位置;然后,结合注入井与生产井的测斜数据,定向井工程师可以不断调整注入井的井眼轨迹按设计要求钻进。

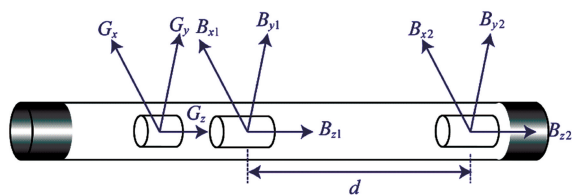


图1 探管内部三轴传感器排列示意图

Fig. 1 Arrangement diagram of all three-axis sensor in probe

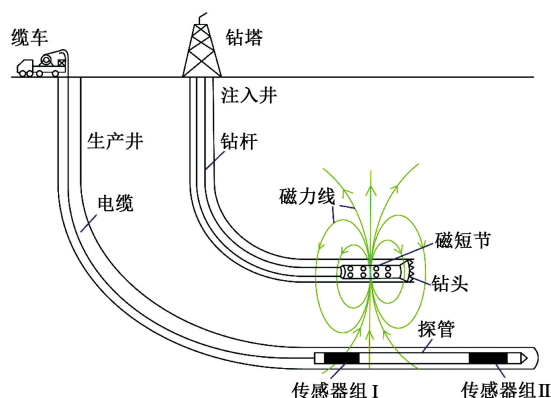


图2 TSP-RMRS 工作示意图

Fig. 2 Operational diagram of TSP-RMRS

2 双水平井快速磁测距算法

在双水平井斜井段,两口井不断靠近,而且并不总是在同一平面上,可以把这两口井斜井段的空间位置关系分解为共面会聚和异面两种情况,并可以用会聚角 α 表征两口井测量井段的会聚程度,用异面夹角 β 表征两口井测量井段的异面程度^[15]。如图3所示,以磁短节的中心为原点 O ,以井眼延伸方

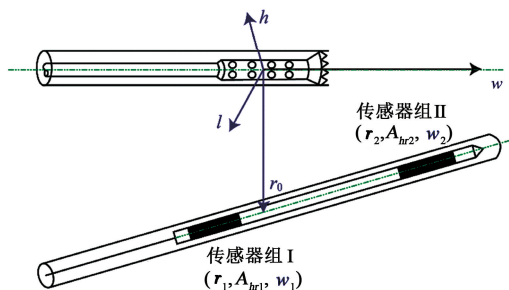


图3 磁短节与探管的空间位置关系

Fig. 3 Spatial position relation between magnetic sub and probe

向为 w 轴,以磁短节到已钻井的径向为 r 轴, q 轴同时正交于 w 轴和 r 轴,建立 $O-rqw$ 坐标系;以磁短节到传感器组I的径向为 r_1 轴, q_1 轴同时正交于 w 轴和 r_1 轴,建立 $O-r_1q_1w$ 坐标系;以磁短节到传感器组II的径向为 r_2 轴, q_2 轴同时正交于 w 轴和 r_2 轴,建立 $O-r_2q_2w$ 坐标系。传感器组I在 $O-r_1q_1w$ 坐标

系中的坐标为 $(r_1, 0, w_1)$;传感器组Ⅱ在 $O-r_2q_2w$ 坐标系中的坐标为 $(r_2, 0, w_2)$ 。

由磁短节产生的磁场感应强度在传感器组Ⅰ处的 r_1 轴和 w 轴分量的幅值^[16]可表示为

$$|B_{r1}| = \frac{\mu m [2(r_1/w_1)^2 - 1]}{4\pi w_1^3 [1 + (r_1/w_1)^2]^{5/2}}, \quad (1)$$

$$|B_{w1}| = \frac{3\mu m (r_1/w_1)}{4\pi w_1^3 [1 + (r_1/w_1)^2]^{5/2}}. \quad (2)$$

同理,由磁短节产生的磁场感应强度在传感器组Ⅱ处的 r_2 轴和 w 轴分量的幅值可表示为

$$|B_{r2}| = \frac{\mu m [2(r_2/w_2)^2 - 1]}{4\pi w_2^3 [1 + (r_2/w_2)^2]^{5/2}}, \quad (3)$$

$$|B_{w2}| = \frac{3\mu m (r_2/w_2)}{4\pi w_2^3 [1 + (r_2/w_2)^2]^{5/2}}. \quad (4)$$

令

$$k_1 = \frac{r_1}{w_1}, \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{r_2}{w_2}. \quad (6)$$

由式(1)、(2)和(5)可得

$$k_1 = \frac{3\left(\frac{|B_{r1}|}{|B_{w1}|}\right) \pm \left[9\left(\frac{|B_{r1}|}{|B_{w1}|}\right)^2 + 8\right]^{1/2}}{4}. \quad (7)$$

式中,当 $w_1 > 0$ 时,取“+”号;当 $w_1 < 0$ 时,取“-”号。

由式(3)、(4)和(6)可得

$$k_2 = \frac{3\left(\frac{|B_{r2}|}{|B_{w2}|}\right) \pm \left[9\left(\frac{|B_{r2}|}{|B_{w2}|}\right)^2 + 8\right]^{1/2}}{4}. \quad (8)$$

式中,当 $w_2 > 0$ 时,取“+”号;当 $w_2 < 0$ 时,取“-”号。

如图4所示,以探管上端传感器组中心为原点,以注入井井眼高边方向和延伸方向分别为 h_1 轴和 w_1 轴, l_1 轴同时正交于 h_1 轴和 w_1 轴,建立 $h_1l_1w_1$ 直角坐标系; h_1 轴到 u_1 轴的夹角 A_{hu1} 为 135° , v_1 轴同时正交于 u_1 轴和 w_1 轴,建立 $u_1v_1w_1$ 直角坐标系。以探管上端三轴磁通门传感器的三个轴建立 $x_1y_1z_1$ 直角坐标系,其中 z_1 轴与探管的轴线重合,并指向探管尾端。

由探管上端传感器组检测到的由磁短节产生磁场的三轴磁感应强度分量 B_{x1} 、 B_{y1} 和 B_{z1} 可得

$$(B_{u1} \ B_{v1} \ B_{w1}) = (B_{x1} \ B_{y1} \ B_{z1}) \{\omega\} \{A_d\} \{I_d\} \{A_{hu}\}, \quad (9)$$

$$(B_{u2} \ B_{v2} \ B_{w2}) = (B_{x2} \ B_{y2} \ B_{z2}) \{\omega\} \{A_d\} \{I_d\} \{A_{hu}\}, \quad (10)$$

$$|B_{r1}| = \max(\sqrt{B_{u1}^2 + B_{v1}^2}), \quad (11)$$

$$|B_{r2}| = \max(\sqrt{B_{u2}^2 + B_{v2}^2}). \quad (12)$$

其中

$$\{\omega\} = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\{A_d\} = \begin{bmatrix} \cos(I_p - I_i) & 0 & -\sin(I_p - I_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(I_p - I_i) & 0 & \cos(I_p - I_i) \end{bmatrix},$$

$$\{I_d\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_p - A_i) & \sin(A_p - A_i) \\ 0 & -\sin(A_p - A_i) & \cos(A_p - A_i) \end{bmatrix},$$

$$\{A_{hu}\} = \begin{bmatrix} \cos A_{hu} & -\sin A_{hu} & 0 \\ \sin A_{hu} & \cos A_{hu} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中, ω 为探管重力工具面角, $(^\circ)$; I_p 和 I_i 分别为生产井和注入井的井斜角, $(^\circ)$; A_p 和 A_i 分别为生产井和注入井的方位角, $(^\circ)$ 。

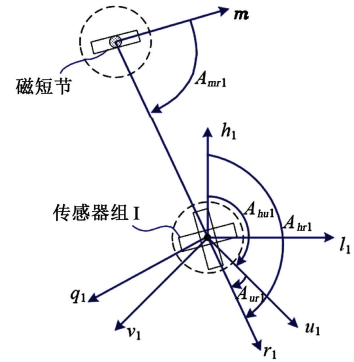


图4 磁短节与传感器组Ⅰ的相对方位

Fig. 4 Relative orientation between magnetic sub and sensor package I

由SAGD双水平井设计轨道的要求可知, $0 < A_{ur1} < 90^\circ$ 。因此, u_1 轴到 r_1 轴夹角 A_{ur1} ^[16]可表示为

$$A_{ur1} = \frac{1}{2} \arccos \left\{ \frac{[(2r_1^2 - w_1^2)^2 + (r_1^2 + w_1^2)^2]}{[(2r_1^2 - w_1^2)^2 - (r_1^2 + w_1^2)^2]} \times \frac{(|B_{u1}|^2 - |B_{v1}|^2)}{(|B_{u1}|^2 + |B_{v1}|^2)} \right\}, \quad (13)$$

由式(13)和角 A_{hu1} 可得 h_1 轴到 r_1 轴夹角 A_{hr1} 为

$$A_{hr1} = 135^\circ + \frac{1}{2} \arccos \left\{ \frac{[(2r_1^2 - w_1^2)^2 + (r_1^2 + w_1^2)^2]}{[(2r_1^2 - w_1^2)^2 - (r_1^2 + w_1^2)^2]} \times \frac{(|B_{u1}|^2 - |B_{v1}|^2)}{(|B_{u1}|^2 + |B_{v1}|^2)} \right\}, \quad (14)$$

即

$$A_{hr1} = 135^\circ + \frac{1}{2} \arccos \left\{ \frac{[(2k_1^2 - 1)^2 + (k_1^2 + 1)^2]}{[(2k_1^2 - 1)^2 - (k_1^2 + 1)^2]} \times \frac{(|B_{u1}|^2 - |B_{v1}|^2)}{(|B_{u1}|^2 + |B_{v1}|^2)} \right\} \quad (15)$$

同理可得

$$A_{hr2} = 135^\circ + \frac{1}{2} \arccos \left\{ \frac{[(2k_2^2 - 1)^2 + (k_2^2 + 1)^2]}{[(2k_2^2 - 1)^2 - (k_2^2 + 1)^2]} \times \frac{(|B_{u2}|^2 - |B_{v2}|^2)}{(|B_{u2}|^2 + |B_{v2}|^2)} \right\} \quad (16)$$

2.1 共面会聚

当 SAGD 双水平井斜井段共面会聚($\alpha > 0$, 且 $\beta = 0$)时, r 轴、 r_1 轴和 r_2 轴共面。如图 5 所示, 点 A 和 B 分别代表传感器组 I 和 II 的中心点; 点 A 和 B 在 w 轴上的投影分别为点 M 和 N ; 线段 EF 平行于 h 轴; 线段 EF 垂直于线段 BF ; g 轴指向点 A 的铅垂线方向。在 $O-rqw$ 坐标系中, 点 A 、 B 、 M 、 N 和 E 的坐标分别为 $(r_1, 0, w_1)$ 、 $(r_2, 0, w_2)$ 、 $(0, 0, w_1)$ 、 $(0, 0, w_2)$ 和 $(r_1, 0, w_2)$ 。

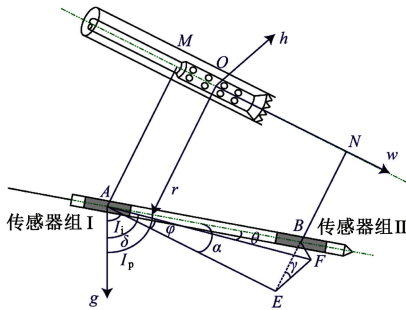


图 5 两口井斜井段共面会聚时磁短节与探管相对位置的计算模型

Fig. 5 Computational model for relative position between magnetic sub and probe when build-up sections of SAGD wells being coplanar

由图 5 可知:

$$\gamma = 180^\circ - A_{hr2}, \quad (17)$$

$$\delta = I_1 + \varphi, \quad (18)$$

$$\cos \alpha = \cos \theta \cos \varphi, \quad (19)$$

$$\cos I_p = \cos \theta \cos \delta, \quad (20)$$

$$\cos \gamma = \frac{-\cos \varphi \cos \alpha + \cos \theta}{\sin \varphi \sin \alpha}. \quad (21)$$

由式 (16) ~ (18) 可得

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\cos I_p \cos \varphi}{\cos I_1 \cos \varphi - \sin I_1 (1 - \cos^2 \varphi)^{1/2}} \right]. \quad (22)$$

由式 (15) ~ (19) 可得

$$\cos \varphi = \left(\frac{\cos^2 I_p + \sin^2 I_1 \cos^2 A_{hr2}}{\cos^2 A_{hr2} + \sin^2 A_{hr2} \cos^2 I_p} \right)^{1/2}. \quad (23)$$

联立式 (22) 和 (23) 即可求得 α 。同时, 由图 5 可知:

$$w_2 - w_1 = d \cos \alpha, \quad (24)$$

$$r_1 = r - w_1 \tan \alpha, \quad (25)$$

$$r_2 = r - w_2 \tan \alpha. \quad (26)$$

联立式 (5)、(6) 和 (22) ~ (24) 可得

$$r = \frac{d(k_2 \cos \alpha + \sin \alpha)(k_1 - \tan \alpha)}{k_1 - k_2}, \quad (27)$$

$$r_1 = \frac{dk_1(k_2 \cos \alpha + \sin \alpha)}{k_1 - k_2}, \quad (28)$$

$$w_1 = \frac{d(k_2 \cos \alpha + \sin \alpha)}{k_1 - k_2}. \quad (29)$$

由于此时两口井的测量井段共面, 因此正钻井井眼高边方向到 r 的夹角 A_{hr} 等于 A_{hr1} 和 A_{hr2} 的值。

2.2 异面

当 SAGD 双水平井斜井段异面($\alpha = 0$ 且 $\beta > 0$)时, 如图 6 所示。在 $O-rqw$ 坐标系中, 点 C 和 D 的坐标分别为 $(r, 0, w_1)$ 和 $(r, 0, w_2)$ 。

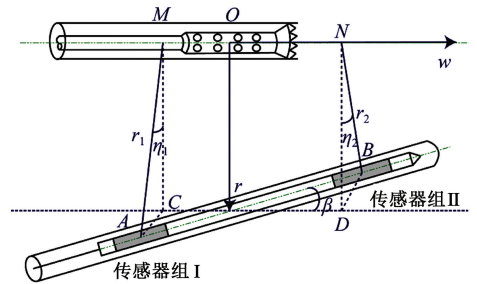


图 6 两口井斜井段异面时磁短节与探管相对位置的计算模型

Fig. 6 Computational model for relative position between magnetic sub and probe when build-up sections of SAGD wells being no-coplanar

由图 6 可知:

$$\frac{|w_1|}{|w_2|} = \frac{L_{AC}}{L_{BD}} = \frac{L_{AC}/r}{L_{BD}/r} = \frac{\tan \eta_1}{\tan \eta_2}, \quad (30)$$

式中, L_{AC} 和 L_{BD} 分别为线段 AC 和 BD 的长度。

$$r_1 = \frac{r}{\cos \eta_1}, \quad (31)$$

$$r_2 = \frac{r}{\cos \eta_2}, \quad (32)$$

$$\eta_1 + \eta_2 = |A_{hr1} - A_{hr2}|, \quad (33)$$

$$w_2 - w_1 = d \cos \beta, \quad (34)$$

$$\frac{L_{AC} + L_{BD}}{d} = \sin \beta, \quad (35)$$

$$L_{AC} = r \tan \eta_1, \quad (36)$$

$$L_{BD} = r \tan \eta_2, \quad (37)$$

$$A_{hr} = \begin{cases} A_{hr1} - \eta_1, & A_{hr1} > A_{hr2}; \\ A_{hr1} + \eta_1, & A_{hr1} < A_{hr2}. \end{cases} \quad (38)$$

联立式(5)、(6)、(31)和(32)可得

$$w_1 = \frac{r}{k_1 \cos \eta_1}, \quad (39)$$

$$w_2 = \frac{r}{k_2 \cos \eta_2}. \quad (40)$$

联立式(30)、(39)和(40)可得

$$\frac{\sin \eta_1}{\sin \eta_2} = \frac{|k_2|}{|k_1|}. \quad (41)$$

结合 η_1 和 η_2 的取值范围,联立式(33)和(41)可求得 η_1 和 η_2 。将求得的 A_{hr1} 、角 A_{hr2} 和 η_1 的值代入式(38),即可求得角 A_{hr} 。

由式(35)~(37)可得

$$r(\tan \eta_1 + \tan \eta_2) = d \sin \beta. \quad (42)$$

联立式(34)、(39)和(40)可得

$$r \left(\frac{1}{k_2 \cos \eta_2} - \frac{1}{k_1 \cos \eta_1} \right) = d \cos \beta. \quad (43)$$

联立式(42)和(43)可得

$$r = \frac{d}{\left[(\tan \eta_1 + \tan \eta_2)^2 + \left(\frac{1}{k_2 \cos \eta_2} - \frac{1}{k_1 \cos \eta_1} \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (44)$$

将求得的 k_1 、 k_2 、 η_1 、 η_2 以及 d 代入式(44)即可求得正钻井到探管径向间距 r 。

3 模拟试验结果

如图 7 所示,模拟磁短节和测试小车都放到无磁支架上,探管放于支架下方。测试小车可以带动模拟磁短节旋转,从而模拟磁短节随钻头在井下旋转。测量过程中无磁支架不动,模拟磁短节摆放的倾斜角为 90.3° 、方位角为 192° ,并通过调整探管摆放的姿态改变会聚角 α 和异面夹角 β 。每次测量时,磁短节都在测试小车的驱动下以一定的角速度旋转,测试小车在无磁支架上不移动。每次测量后,测试小车在无磁支架上移动 0.25 m。

当模拟两口井斜井段共面会聚且 α 等于 5° 、角 β 等于 0° 时,探管检测到的 z 轴(即探管的轴线方向)磁感应强度信号如图 8 所示。由图 8 可知,每次测量得到的 z 轴磁感应强度信号的幅值基本保持不变。因此无法由 z 轴磁感应强度信号的幅值定性判断两口的会聚/发散和异面的程度。

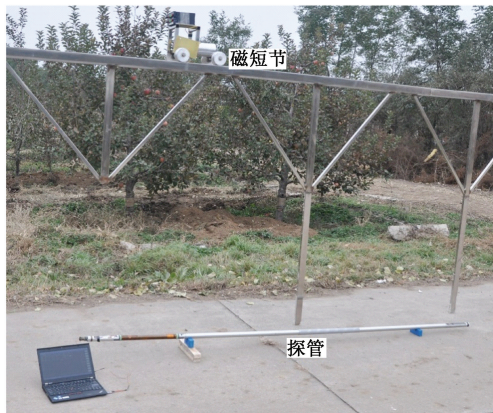


图 7 试验中的 TSP-RMRS 模拟装置

Fig. 7 Simulated TSP-RMRS in experiment

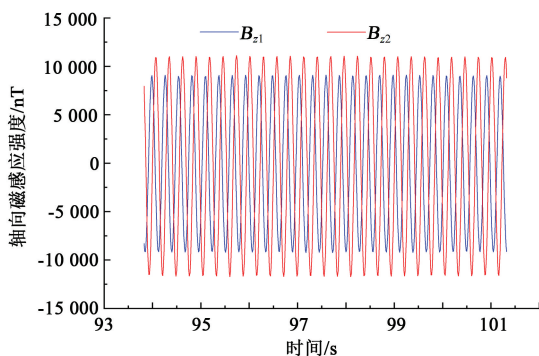
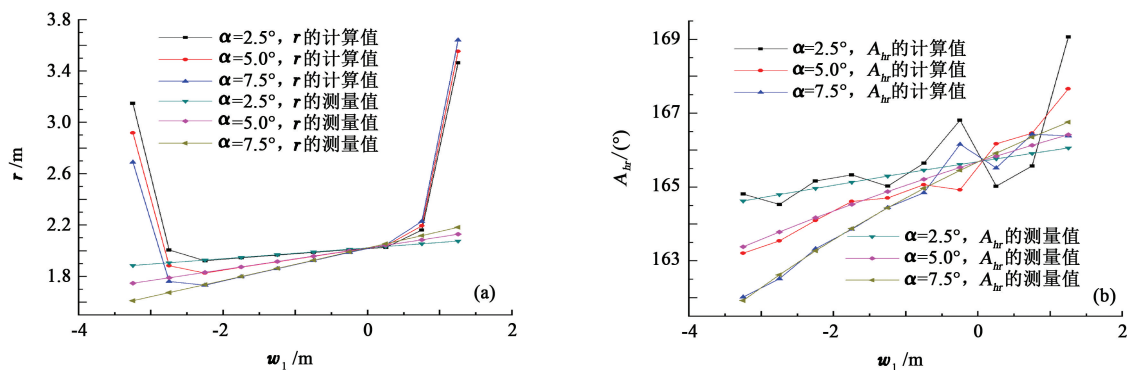
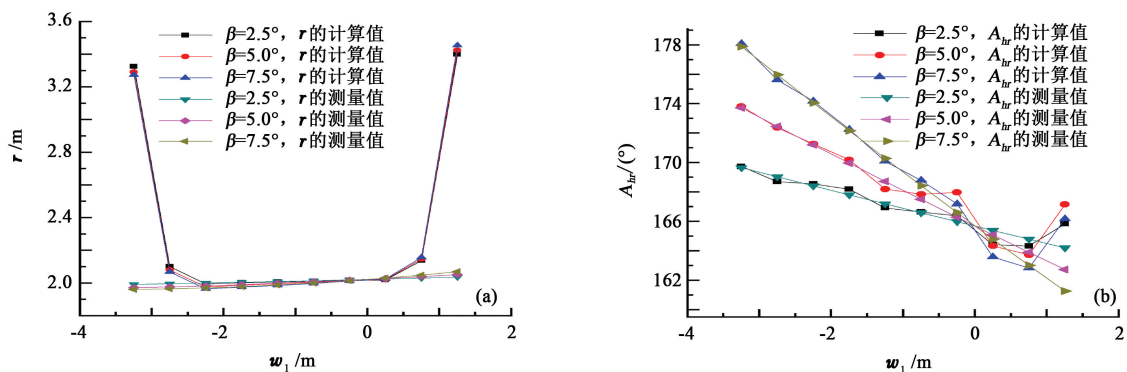


图 8 探管记录的轴向磁感应强度随时间的变化

Fig. 8 Variation in axial magnetic induction intensity over time recorded by probe

当 β 等于 0° 、 α 取不同值时,模拟磁短节到探管径向间距 r 和角 A_{hr} 的计算值与真实值,结果如图 9 所示。当角 α 等于 0° 、角 β 取不同值时,模拟磁短节到探管径向间距和 A_{hr} 的计算值与真实值如图 10 所示。由图 9 和 10 可知, w_1 的变化对模拟磁短节到探管径向间距 r 的计算精度具有很大影响,然而 w_1 的变化对 A_{hr} 的计算精度影响较小;当探管检测到的信号具有较好质量时,模拟磁短节到探管径向间距对 r 和 A_{hr} 的计算精度影响较小;当 $-d \leq w_1 \leq 0$ 时,模拟磁短节到两组传感器的轴向距离同时小于等于两组传感器的间距,此时由本文中介绍的测距算法得到的 r 和 A_{hr} 都具有很好的计算精度。在实际应用中,可以通过调整探管下放井深,达到磁短节到探管内部两组传感器的轴向距离同时小于等于两组传感器间距的目标。因此本文中的测距算法可以用于 SAGD 双水平井导向钻井工程。同时,综合考虑 SAGD 双水平井设计间距、探管井深测量误差和探管结构的抗弯强度,建议探管内部两组传感器的间距 d 设计为 5 m。

图9 α 不同时 r 和 A_{hr} 的计算值与真实值Fig. 9 Calculated and measured values for r and A_{hr} with different α values图10 β 不同时 r 和 A_{hr} 的计算值与真实值Fig. 10 Calculated values and measured values for r and A_{hr} with different β values

4 结 论

(1) SAGD 双水平井斜井段邻井距离的精确测量与精细控制, 有利于进一步提高两口井水平井段邻井距离的控制效果, 而建立考虑斜井段两口井非平行空间位置关系的磁测距算法是实现斜井段邻井距离精确测量的关键。

(2) 提出的考虑会聚角和异面夹角影响的 TSP-RMRS 测距算法, 适用于 SAGD 双水平井斜井段邻井距离的测量, 同时不需要磁短节随钻头钻进一段距离, 有利于提高邻井距离的计算精度。

(3) 当磁短节到探管内部两组传感器的轴向距离同时小于等于两组传感器的间距时, SAGD 双水平井斜井段的 TSP-RMRS 磁测距算法的计算精度可以满足钻井现场的实际需求。

参考文献:

[1] BUTLER R M, STEPHENS D J. The gravity drainage of steam-heated heavy oil to parallel horizontal wells [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1981, 20 (2): 90-96.

[2] 林晶, 宋朝晖, 罗煜恒, 等. SAGD 水平井钻井技术 [J]. 新疆石油天然气, 2009, 5(3): 56-60.
LIN Jing, SONG Zhaohui, LUO Yuheng, et al. SAGD horizontal well drilling technology [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2009, 5(3): 56-60.

[3] 杨睿, 关志刚, 蒋刚, 等. 新疆风城油田 SAGD 平行水平井钻井技术 [J]. 石油机械, 2009, 37(8): 79-82.
YANG Rui, GUAN Zhigang, JIANG Gang, et al. Drilling technology of dual horizontal wells for SAGD of Fengcheng oilfield, Xinjiang [J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(8): 79-82.

[4] 万 亿, 张祖海, 盛春明, 等. 风城油田重 18 井区浅层 SAGD 双水平井钻井技术 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 41-44.
WAN Yi, ZHANG Zuhai, SHENG Chunming, et al. Shallow dual horizontal well drilling technology for SAGD in Zhong18 well area of Fengcheng Oilfield [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(3): 41-44.

[5] 何万军, 木合塔尔, 董宏, 等. 风城油田重 37 井区 SAGD 开发提高采收率技术 [J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 483-486.
HE Wanjun, MUHE Taer, DONG Hong, et al. EOR

- technologies of SAGD development in Zhong-37 well-block, Fengcheng Oilfield, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015,36(4):483-486.
- [6] 袁士义,王强. 中国油田开发主体技术新进展与展望[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):657-668.
- YUAN Shiyi, WANG Qiang. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4): 657-668.
- [7] KUCKES A F, HAY R T, MCMAHON J, et al. New electromagnetic surveying/ranging method for drilling parallel horizontal twin wells[R]. SPE 27466, 1996.
- [8] GRILLS T L. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries—a comparison of technologies [R]. SPE 79005, 2002.
- [9] NEKUT A G, KUCKES A F, PITZER R G. Rotating magnet ranging—a new drilling guidance technology [R]. SPE CIM-01-01-MS, 2001.
- [10] 陈若铭,陈勇,罗维,等. MGT 导向技术在 SAGD 双水平中的应用及研制[J]. 新疆石油天然气,2011,7(3):25-28, 37.
- CHEN Ruoming, CHEN Yong, LUO Wei, et al. Application of magnetic guidance technology in SAGD double horizontal well and development[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2011,7(3):25-28,37.
- [11] 刁斌斌,高德利. 螺线管随钻测距导向系统[J]. 石油学报,2011,32(6):1061-1066.
- DIAO Binbin, GAO Deli. A solenoid ranging guidance system while drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(6):1061-1066.
- [12] 刁斌斌,高德利,吴志永. 双水平井导向钻井磁测距计算方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(6):71-75.
- DIAO Binbin, GAO Deli, WU Zhiyong. Magnet ranging calculation method of twin parallel horizontal wells steerable drilling[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2011,35(6):71-75.
- [13] GAO Deli, DIAO Binbin, WU Zhiyong, et al. Research into magnetic guidance technology for directional drilling in SAGD horizontal wells[J]. Petroleum Science,2013,10(4):500-506.
- [14] 宗艳波,王磊,史晓锋. SAGD 成对水平井磁导向测距仪研制与应用[J]. 石油学报,2016,37(11):1428-1434.
- ZONG Yanbo, WANG Lei, SHI Xiaofeng. Development and application of magnetic positioning system for SAGD pairing horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11):1428-1434.
- [15] DIAO Binbin, GAO Deli. A magnet ranging calculation method for steerable drilling in build-up sections of twin parallel horizontal wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015(27): 1702-1709.
- [16] DIAO Binbin, GAO Deli. A new rotating magnet ranging method for drilling twin parallel horizontal SAGD wells[J]. Petroleum Science and Technology, 2013,31(24):2643-2651.

(编辑 李志芬)