



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112145156 B

(45) 授权公告日 2021.05.07

(21) 申请号 202010684035.7

WO 2010039317 A1,2010.04.08

(22) 申请日 2020.07.16

US 2012179445 A1,2012.07.12

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 尹浚羽

申请公布号 CN 112145156 A

(43) 申请公布日 2020.12.29

(73) 专利权人 中国石油大学(华东)

地址 266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号

(72) 发明人 黄根炉 于凡 李伟

(51) Int.Cl.

E21B 47/022 (2012.01)

G06F 17/10 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107201894 A,2017.09.26

US 4715452 A,1987.12.29

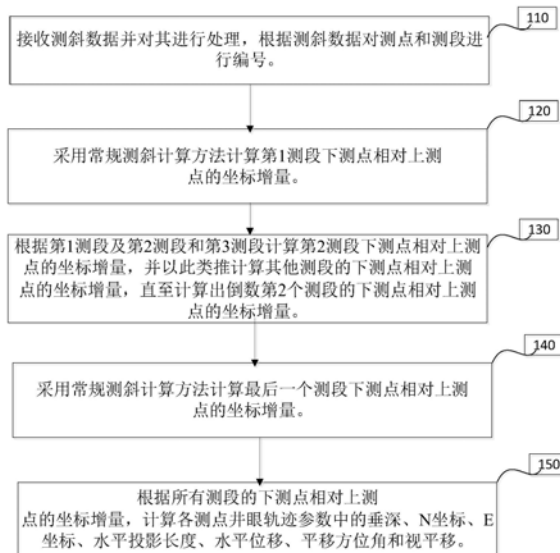
权利要求书4页 说明书16页 附图1页

(54) 发明名称

一种井眼轨迹自适应测斜计算方法

(57) 摘要

本发明涉及石油钻井中一种井眼轨迹自适应测斜计算方法,属于油气钻采技术领域,通过计算测段及其前、后两个测段对应的四个测点测量参数,识别所计算测段的曲线特征,从而选择合适的曲线计算测段的坐标增量,能够根据所计算测段及其前、后两个测段的井斜角、方位角变化规律,自动优选出与所计算测段井眼轨迹形状较为接近的曲线特征参数,自动拟合出与实钻井眼轨迹最接近的曲线类型并进行测斜计算,避免了由于假定的曲线类型与实钻井眼轨迹曲线不匹配造成的误差,显著提高了井眼轨迹测斜计算的精度,在救援井、连通井、平行水平井和密集井眼防碰等方面有重要意义。



1. 一种井眼轨迹自适应测斜计算方法,其特征在于,所述井眼轨迹自适应测斜计算方法包括:

接收测斜数据并对其进行处理,根据测斜数据对测点和测段进行编号;

采用常规测斜计算方法计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量;

根据第1测段及第2测段和第3测段计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量,并以此类推计算其他测段的下测点相对上测点的坐标增量,直至计算出倒数第2个测段的下测点相对上测点的坐标增量;

采用常规测斜计算方法计算最后一个测段下测点相对上测点的坐标增量;

根据所有测段的下测点相对上测点的坐标增量,计算各测点井眼轨迹参数中的垂深、N坐标、E坐标、水平投影长度、水平位移、平移方位角和视平移;

其中,所述根据第1测段及第2测段和第3测段计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量,具体包括:

根据第1测段和第2测段对应的三测点井深、井斜角和方位角,计算第2测段上测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值;

根据第2测段和第3测段对应的三测点井深、井斜角和方位角,计算第2测段下测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值;

计算第2测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率、挠率的平均变化率和工具面角增量;

以第2测段上测点预估的井眼曲率、挠率和工具面角为参考值,以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率和工具面角增量的 $\pm 10\%$ 为波动范围,确定第2测段的井眼曲率、挠率和工具面角的取值范围;

以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率的平均变化率为参考值,以参考值上、下波动5%确定第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围;

在确定的第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围内,针对第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率,计算第2测段下测点的井斜角、方位角、井眼曲率和挠率;

计算第2测段下测点处井斜角和方位角的计算值与实测值的综合角度偏差和第2测段上测点、下测点处曲率、挠率的计算值和预估值的综合偏差,在满足第2测段下测点角度偏差小于规定值0.0002的前提下,按照第2测段上测点、下测点处曲率、挠率的综合偏差最小原则确定第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率最优值;

根据第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和第2测段曲率变化率、挠率变化率最优值,计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量。

2. 根据权利要求1所述的井眼轨迹自适应测斜计算方法,其特征在于,所述坐标增量包括垂深增量、水平投影长度增量、N坐标增量和E坐标增量。

3. 根据权利要求2所述的井眼轨迹自适应测斜计算方法,其特征在于,所述采用常规测斜计算方法计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量,具体包括:

根据公式  $\gamma_{01} = \arccos[\cos\alpha_0 \cdot \cos\alpha_1 + \sin\alpha_0 \cdot \sin\alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_0)]$  计算第1测段的狗腿角,其中, $\gamma_{01}$ 为第1测段的狗腿角; $\alpha_0$ 为第0测点井斜角, $\alpha_1$ 为第1测点井斜角,

$\varphi_0$ 为第0测点方位角,  $\varphi_1$ 为第1测点方位角;

若第1测段的狗腿角等于零,则采用如下公式计算第1测段下测点相对上测点的坐标增

$$\text{量} \begin{cases} \Delta D_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \cos\alpha_0 \\ \Delta L_{p01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \\ \Delta N_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 \\ \Delta E_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 \end{cases}, \text{其中, } L_0 \text{为第0测点井深, } m; L_1 \text{为第1测点井深,}$$

$\Delta D_{01}$ 为第1测段垂深的增量,  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量,  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量;

若第1测段的狗腿角大于零,则采用如下公式计算第1测段下测点相对上测点的坐标增

$$\text{量} \begin{cases} \Delta D_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\cos\alpha_0 + \cos\alpha_1) \\ \Delta L_{p01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 + \sin\alpha_1) \\ \Delta N_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \cos\varphi_1) \\ \Delta E_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \sin\varphi_1) \end{cases}, \text{其中, } \Delta D_{01} \text{为第1}$$

测段垂深的增量,  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量,  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量,  $R_{01}$ 为第1测段圆弧的曲率半径。

4. 根据权利要求2所述的井眼轨迹自适应测斜计算方法,其特征在于,所述采用常规测斜计算方法计算最后一个测段下测点相对上测点的坐标增量,具体包括:

根据公式

$$\gamma_{(m-1)m} = \arccos[\cos\alpha_{m-1} \cos\alpha_m + \sin\alpha_{m-1} \sin\alpha_m \cos(\varphi_m - \varphi_{m-1})]$$
 计算

最后一个测段的狗腿角,其中,  $\gamma_{(m-1)m}$ 为第m测段的狗腿角,  $\alpha_m$ 为第m测点井斜角,  $\varphi_m$ 为第m测点方位角,  $\alpha_{m-1}$ 为第m-1测点井斜角,  $\varphi_{m-1}$ 为第m-1测点方位角;

若第m测段的狗腿角等于零,则采用公式

$$\begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \cos\alpha_m \\ \Delta L_{p(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \\ \Delta N_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m \\ \Delta E_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m \end{cases} \text{计算第1测段下测点相对上测点的坐标}$$

增量,其中,  $L_m$ 为第m测点井深,  $L_{m-1}$ 为第m-1测点井深,  $\Delta D_{(m-1)m}$ 为第m测段垂深的增量,  $\Delta L_{p(m-1)m}$ 为第m测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{(m-1)m}$ 为第m测段N坐标的增量,  $\Delta E_{(m-1)m}$ 为第m测段E坐标的增量;

若第m测段的狗腿角大于零,则采用公式

$$\begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\cos\alpha_{m-1} + \cos\alpha_m) \\ \Delta L_{p(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} + \sin\alpha_m) \\ \Delta N_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \cos\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m) \\ \Delta E_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \sin\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m) \end{cases}$$

计算第m测段下测点相对上测点的坐标增量,其中,  $\Delta D_{(m-1)m}$ 为第m测段垂深的增量,  $\Delta$

$L_{p(m-1)m}$ 为第m测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{(m-1)m}$ 为第m测段N坐标的增量,  $\Delta E_{(m-1)m}$ 为第m测段E坐标的增量,  $R_{(m-1)m}$ 为第m测段圆弧的曲率半径。

5. 根据权利要求3所述的井眼轨迹自适应测斜计算方法, 其特征在于, 所述根据第1测段和第2测段对应的三测点井深、井斜角和方位角, 计算第2测段上测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值, 具体为:

根据公式  $k_{1e} = \sqrt{k_{\alpha 1}^2 + k_{\varphi 1}^2 \sin^2 \alpha_1}$  计算第2测段上测点的井眼曲率的预估值, 其中,  $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角,  $k_{1e}$ 为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 1}$ 为第1个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 1}$ 为第1个测点处的方位变化率;

根据公式  $\tau_{1e} = \frac{k_{\alpha 1} k_{\varphi 1} - k_{\varphi 1} k_{\alpha 1}}{k_{1e}^2} \sin \alpha_1 + k_{\varphi 1} \left( 1 + \frac{k_{\alpha 1}^2}{k_{1e}^2} \right) \cos \alpha_1$  计算第2测段上测点的挠率的预估值, 其中,  $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角,  $k_{1e}$ 为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 1}$ 为第1个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 1}$ 为第1个测点处的方位变化率,  $\dot{k}_{\alpha 1}$ 为第1个测点处井斜变化率的变化率,  $\dot{k}_{\varphi 1}$ 为第1个测点处方位变化率的变化率,  $\tau_{1e}$ 为第1个测点处井眼挠率的预估值;

根据公式  $\omega_{1e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \text{sgn}(\Delta \varphi_{01}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1 \cos \gamma_{01}}{\sin \alpha_1 \sin \gamma_{01}} \right) \\ + \text{sgn}(\Delta \varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_1 \cos \gamma_{12} - \cos \alpha_2}{\sin \alpha_1 \sin \gamma_{12}} \right) \end{array} \right]$  计算第2测段上测点

的工具面角的预估值, 其中,  $\omega_{1e}$ 为第1个测点处工具面角的预估值,  $\Delta \varphi_{01}$ 为第1测段的方位角增量,  $\Delta \varphi_{12}$ 为第2测段的方位角增量,  $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角,  $\alpha_0$ 为第0测点的井斜角,  $\alpha_2$ 为第2测点的井斜角,  $\gamma_{01}$ 为第1测段的狗腿角,  $\gamma_{12}$ 为第2测段的狗腿角。

6. 根据权利要求3所述的井眼轨迹自适应测斜计算方法, 其特征在于, 所述根据第2测段和第3测段对应的三测点井深、井斜角和方位角, 计算第2测段下测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值, 具体为:

根据公式  $k_{2e} = \sqrt{k_{\alpha 2}^2 + k_{\varphi 2}^2 \sin^2 \alpha_2}$  计算第2测段下测点的井眼曲率的预估值, 其中,  $\alpha_2$ 为第2测点的井斜角,  $k_{2e}$ 为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 2}$ 为第2个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 2}$ 为第2个测点处的方位变化率;

根据公式  $\tau_{2e} = \frac{k_{\alpha 2} k_{\varphi 2} - k_{\varphi 2} k_{\alpha 2}}{k_{2e}^2} \sin \alpha_2 + k_{\varphi 2} \left( 1 + \frac{k_{\alpha 2}^2}{k_{2e}^2} \right) \cos \alpha_2$  计算第2测段下测点的挠率的预估值, 其中,  $\alpha_2$ 为第2测点的井斜角,  $k_{2e}$ 为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 2}$ 为第2个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 2}$ 为第2个测点处的方位变化率,  $\dot{k}_{\alpha 2}$ 为第2个测点处井斜变化率的变化率,  $\dot{k}_{\varphi 2}$ 为第2个测点处方位变化率的变化率,  $\tau_{2e}$ 为第2个测点处井眼挠率的预估值;

根据公式  $\omega_{2e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \text{sgn}(\Delta\varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 \cos\gamma_{12}}{\sin\alpha_2 \sin\gamma_{12}} \right) \\ + \text{sgn}(\Delta\varphi_{23}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos\alpha_2 \cos\gamma_{23} - \cos\alpha_3}{\sin\alpha_2 \sin\gamma_{23}} \right) \end{array} \right]$  计算第1测段上测点

的工具面角的预估值,其中, $\omega_{2e}$ 为第2个测点处工具面角的预估值, $\Delta\varphi_{02}$ 为第2测段的方位角增量, $\Delta\varphi_{23}$ 为第3测段的方位角增量, $\alpha_2$ 为第3测点的井斜角, $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角, $\alpha_{23}$ 为第4测点的井斜角, $\gamma_{12}$ 为第2测段的狗腿角, $\gamma_{23}$ 为第3测段的狗腿角。

7.根据权利要求3所述的井眼轨迹自适应测斜计算方法,其特征在于,所述计算第2测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率、挠率的平均变化率和工具面角增量,具体为:

根据公式  $A_{k12} = \frac{k_{2e} - k_{1e}}{L_2 - L_1}$  计算第2测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率,其中, $A_{k12}$ 为第2测段井眼曲率的平均变化率, $L_1$ 为第1测点井深, $L_2$ 为第2测点井深, $k_{1e}$ 为第1个测点处井眼曲率的预估值, $k_{2e}$ 为第2个测点处井眼曲率的预估值;

根据公式  $A_{\tau12} = \frac{\tau_{2e} - \tau_{1e}}{L_2 - L_1}$  计算第2测段的上测点、下测点之间预估的挠率的平均变化率,其中, $A_{\tau12}$ 为第2测段井眼挠率的平均变化率, $\tau_{1e}$ 为第1个测点处井眼挠率的预估值, $\tau_{2e}$ 为第2个测点处井眼挠率的预估值;

根据公式  $\Delta\omega_{12} = \begin{cases} (\omega_{2e} - \omega_{1e} + 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} < -\pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e}) & (-\pi \leq \omega_{2e} - \omega_{1e} \leq \pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e} - 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} > \pi) \end{cases}$  计算第2测段的

上测点、下测点之间预估的工具面角增量,其中, $\Delta\omega_{12}$ 为第2测段工具面角的增量, $\omega_{1e}$ 为第1个测点处工具面角的预估值, $\omega_{2e}$ 为第2个测点处工具面角的预估值。

## 一种井眼轨迹自适应测斜计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及油气钻井技术领域,尤其涉及一种井眼轨迹自适应测斜计算方法。

### 背景技术

[0002] 石油钻井中井眼轨迹的测斜计算通常需要假设两个测点之间测段的曲线类型,然后根据该类曲线的特征和两端的井眼方向约束,确定该测段的坐标增量,从而确定井眼轨迹各测点的坐标。

[0003] 然而,由于两个测点之间实际井眼轨迹为何种曲线是未知的,针对任何轨迹的所有测段假设一种曲线类型进行测斜计算,在假设曲线与测段实际曲线不一致时必然会导致较大的轨迹计算误差。

[0004] 针对此问题,最新的测斜计算方法以实际测量得到的各测点井斜角和方位角为样本点,采取三次样条插值得到各测段的井斜角和方位角三次样条插值函数,通过数值积分得到井眼轨迹。从理论上讲,这样的处理方法一定程度上降低了井眼轨迹的计算误差,但三次样条插值要求插值函数在样本点(测点)处二阶导数连续,而实际钻井可能由于钻具组合、地层、钻进方式(滑动钻进或旋转钻进)、钻进参数等变化,使得井斜角和方位角的一阶、二阶导数发生显著变化,这种情况可能会导致插值函数的震荡,产生远超预期的误差。此外,该方法对样本点的误差也非常敏感,且测段长度越短,敏感度越高,甚至会发生不合理的震荡。

### 发明内容

[0005] 本发明提供一种井眼轨迹自适应测斜计算方法,旨在解决现有技术中测斜计算精度差的问题,通过计算测段及其前、后两个测段对应的四个测点测量参数,识别所计算测段的曲线特征,从而选择合适的曲线计算测段的坐标增量,可以自适应匹配与待计算测段井眼轨迹形状较为接近的曲线特征参数,可以显著提高井眼轨迹测斜计算的精度。

[0006] 本发明采用的技术方案如下:

[0007] 本发明提供一种井眼轨迹自适应测斜计算方法包括:

[0008] 接收测斜数据并对其进行预处理,根据测斜数据对测点和测段进行编号;

[0009] 采用常规测斜计算方法计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量;

[0010] 根据第1测段及第2测段和第3测段计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量,并以此类推计算其他测段的下测点相对上测点的坐标增量,直至计算出倒数第2个测段的下测点相对上测点的坐标增量;

[0011] 采用常规测斜计算方法计算最后一个测段下测点相对上测点的坐标增量;

[0012] 根据所有测段的下测点相对上测点的坐标增量,计算各测点井眼轨迹参数中的垂深、N坐标、E坐标、水平投影长度、水平位移、平移方位角和视平移。

[0013] 可选的,所述坐标增量包括垂深增量、水平投影长度增量、N坐标增量和E坐标增量。

[0014] 可选的,所述根据第1测段及第2测段和第3测段计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量,具体包括:

[0015] 根据第1测段和第2测段对应的三测点井深、井斜角和方位角,计算第2测段上测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值;

[0016] 根据第2测段和第3测段对应的三测点井深、井斜角和方位角,计算第2测段下测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值;

[0017] 计算第2测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率、挠率的平均变化率和工具面角增量;

[0018] 以第2测段上测点预估的井眼曲率、挠率和工具面角为参考值,以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率和工具面角增量的 $\pm 10\%$ 为波动范围,确定第2测段的井眼曲率、挠率和工具面角的取值范围;

[0019] 以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率的平均变化率为参考值,以参考值上、下波动 $5\%$ 确定第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围;

[0020] 在确定的第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围内,针对第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率,计算第2测段下测点的井斜角、方位角、井眼曲率和挠率;

[0021] 计算第2测段下测点处井斜角和方位角的计算值与实测值的综合角度偏差和第2测段上测点、下测点处曲率、挠率的计算值和预估值的综合偏差,在满足第2测段下测点角度偏差小于规定值 $0.0002$ 的前提下,按照第2测段上测点、下测点处曲率、挠率的综合偏差最小原则确定第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率最优值;

[0022] 根据第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和第2测段曲率变化率、挠率变化率最优值,计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量。

[0023] 可选的,所述采用常规测斜计算方法计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量,具体包括:

[0024] 根据公式  $\gamma_{01} = \arccos[\cos\alpha_0 \cdot \cos\alpha_1 + \sin\alpha_0 \cdot \sin\alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_0)]$  计算第1测段的狗腿角,其中, $\gamma_{01}$ 为第1测段的狗腿角; $\alpha_0$ 为第0测点井斜角, $\alpha_1$ 为第1测点井斜角, $\varphi_0$ 为第0测点方位角, $\varphi_1$ 为第1测点方位角;

[0025] 若第1测段的狗腿角等于零,则采用如下公式计算第1测段下测点相对上测点的坐

$$\text{标增量} \begin{cases} \Delta D_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \cos\alpha_0 \\ \Delta L_{p01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \\ \Delta N_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 \\ \Delta E_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 \end{cases}, \text{其中}, L_0 \text{为第0测点井深, m}; L_1 \text{为第1测点井}$$

深,  $\Delta D_{01}$ 为第1测段垂深的增量,  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量,  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量;

[0026] 若第1测段的狗腿角大于零,则采用如下公式计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量

$$[0027] \quad \begin{cases} \Delta D_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\cos\alpha_0 + \cos\alpha_1) \\ \Delta L_{p01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 + \sin\alpha_1) \\ \Delta N_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \cos\varphi_1) \\ \Delta E_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \sin\varphi_1) \end{cases}, \text{其中,}$$

[0028]  $\Delta D_{01}$ 为第1测段垂深的增量,  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量,  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量,  $R_{01}$ 为第1测段圆弧的曲率半径。

[0029] 可选的,所述采用常规测斜计算方法计算最后一个测段下测点相对上测点的坐标增量,具体包括:

[0030] 根据公式

$$[0031] \quad \gamma_{(m-1)m} = \arccos[\cos\alpha_{m-1}\cos\alpha_m + \sin\alpha_{m-1}\sin\alpha_m\cos(\varphi_m - \varphi_{m-1})]$$

[0032] 计算最后一个测段的狗腿角,其中,  $\gamma_{(m-1)m}$ 为第m测段的狗腿角,  $\alpha_m$ 为第m测点井斜角,  $\varphi_m$ 为第m测点方位角,  $\alpha_{m-1}$ 为第m-1测点井斜角,  $\varphi_{m-1}$ 为第m-1测点方位角;

[0033] 若第m测段的狗腿角等于零,则采用公式

$$[0034] \quad \begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \cos\alpha_m \\ \Delta L_{p(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \\ \Delta N_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m \\ \Delta E_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m \end{cases} \text{计算第1测段下测点相对上测}$$

点的坐标增量,其中,  $L_m$ 为第m测点井深,  $L_{m-1}$ 为第m-1测点井深,  $\Delta D_{(m-1)m}$ 为第m测段垂深的增量,  $\Delta L_{p(m-1)m}$ 为第m测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{(m-1)m}$ 为第m测段N坐标的增量,  $\Delta E_{(m-1)m}$ 为第m测段E坐标的增量;

[0035] 若第m测段的狗腿角大于零,则采用公式

$$[0036] \quad \begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\cos\alpha_{m-1} + \cos\alpha_m) \\ \Delta L_{p(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} + \sin\alpha_m) \\ \Delta N_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \cos\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m) \\ \Delta E_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \sin\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m) \end{cases}$$

[0037] 计算第m测段下测点相对上测点的坐标增量,其中,  $\Delta D_{(m-1)m}$ 为第m测段垂深的增量,  $\Delta L_{p(m-1)m}$ 为第m测段水平投影长度的增量,  $\Delta N_{(m-1)m}$ 为第m测段N坐标的增量,  $\Delta E_{(m-1)m}$ 为第m测段E坐标的增量,  $R_{(m-1)m}$ 为第m测段圆弧的曲率半径。

[0038] 可选的,所述根据第1测段和第2测段对应的三测点井深、井斜角和方位角,计算第2测段上测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值,具体为:

$$[0039] \quad \text{根据公式 } k_{1e} = \sqrt{k_{\alpha 1}^2 + k_{\varphi 1}^2 \sin^2\alpha_1} \text{ 计算第2测段上测点的井眼曲率的预估值}$$

值,其中,  $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角,  $k_{1e}$ 为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 1}$ 为第1个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 1}$ 为第1个测点处的方位变化率;



[0040] 根据公式  $\tau_{1e} = \frac{k_{\alpha_1} \dot{k}_{\varphi_1} - k_{\varphi_1} \dot{k}_{\alpha_1}}{k_{1e}^2} \sin \alpha_1 + k_{\varphi_1} \left(1 + \frac{k_{\alpha_1}^2}{k_{1e}^2}\right) \cos \alpha_1$  计算第2测段上测点的挠率的预估值, 其中,  $\alpha_1$  为第1测点的井斜角,  $k_{1e}$  为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha_1}$  为第1个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi_1}$  为第1个测点处的方位变化率,  $\dot{k}_{\alpha_1}$  为第1个测点处井斜变化率的变化率,  $\dot{k}_{\varphi_1}$  为第1个测点处方位变化率的变化率,  $\tau_{1e}$  为第1个测点处井眼挠率的预估值;

[0041] 根据公式  $\omega_{1e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \operatorname{sgn}(\Delta\varphi_{01}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1 \cos \gamma_{01}}{\sin \alpha_1 \sin \gamma_{01}} \right) \\ + \operatorname{sgn}(\Delta\varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_1 \cos \gamma_{12} - \cos \alpha_2}{\sin \alpha_1 \sin \gamma_{12}} \right) \end{array} \right]$  计算第2测段上

测点的工具面角的预估值, 其中,  $\omega_{1e}$  为第1个测点处工具面角的预估值,  $\Delta\varphi_{01}$  为第1测段的方位角增量,  $\Delta\varphi_{12}$  为第2测段的方位角增量,  $\alpha_1$  为第1测点的井斜角,  $\alpha_0$  为第0测点的井斜角,  $\alpha_2$  为第2测点的井斜角,  $\gamma_{01}$  为第1测段的狗腿角,  $\gamma_{12}$  为第2测段的狗腿角。

[0042] 可选的, 所述根据第2测段和第3测段对应的三测点井深、井斜角和方位角, 计算第2测段下测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值, 具体为:

[0043] 根据公式  $k_{2e} = \sqrt{k_{\alpha_2}^2 + k_{\varphi_2}^2 \sin^2 \alpha_2}$  计算第2测段下测点的井眼曲率的预估值, 其中,  $\alpha_2$  为第2测点的井斜角,  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha_2}$  为第2个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi_2}$  为第2个测点处的方位变化率;

[0044] 根据公式  $\tau_{2e} = \frac{k_{\alpha_2} \dot{k}_{\varphi_2} - k_{\varphi_2} \dot{k}_{\alpha_2}}{k_{2e}^2} \sin \alpha_2 + k_{\varphi_2} \left(1 + \frac{k_{\alpha_2}^2}{k_{2e}^2}\right) \cos \alpha_2$  计算第2测段下测点的挠率的预估值, 其中,  $\alpha_2$  为第2测点的井斜角,  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha_2}$  为第2个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi_2}$  为第2个测点处的方位变化率,  $\dot{k}_{\alpha_2}$  为第2个测点处井斜变化率的变化率,  $\dot{k}_{\varphi_2}$  为第2个测点处方位变化率的变化率,  $\tau_{2e}$  为第2个测点处井眼挠率的预估值;

[0045] 根据公式  $\omega_{2e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \operatorname{sgn}(\Delta\varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 \cos \gamma_{12}}{\sin \alpha_2 \sin \gamma_{12}} \right) \\ + \operatorname{sgn}(\Delta\varphi_{23}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_2 \cos \gamma_{23} - \cos \alpha_3}{\sin \alpha_2 \sin \gamma_{23}} \right) \end{array} \right]$  计算第1测段上

测点的工具面角的预估值, 其中,  $\omega_{2e}$  为第2个测点处工具面角的预估值,  $\Delta\varphi_{02}$  为第2测段的方位角增量,  $\Delta\varphi_{23}$  为第3测段的方位角增量,  $\alpha_2$  为第3测点的井斜角,  $\alpha_1$  为第1测点的井斜角,  $\alpha_{23}$  为第4测点的井斜角,  $\gamma_{12}$  为第2测段的狗腿角,  $\gamma_{23}$  为第3测段的狗腿角。

[0046] 可选的, 所述计算第*i*测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率、挠率的平均变化率和工具面角增量, 具体为:

[0047] 根据公式  $A_{k12} = \frac{k_{2e} - k_{1e}}{L_2 - L_1}$  计算第i测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率, 其中,  $A_{k12}$  为第2测段井眼曲率的平均变化率,  $L_1$  为第1测点井深,  $L_2$  为第2测点井深,  $k_{1e}$  为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值;

[0048] 根据公式  $A_{\tau12} = \frac{\tau_{2e} - \tau_{1e}}{L_2 - L_1}$  计算第i测段的上测点、下测点之间预估的挠率的平均变化率, 其中,  $A_{\tau12}$  为第2测段井眼挠率的平均变化率,  $\tau_{1e}$  为第1个测点处井眼挠率的预估值,  $\tau_{2e}$  为第2个测点处井眼挠率的预估值;

[0049] 根据公式  $\Delta\omega_{12} = \begin{cases} (\omega_{2e} - \omega_{1e} + 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} < -\pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e}) & (-\pi \leq \omega_{2e} - \omega_{1e} \leq \pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e} - 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} > \pi) \end{cases}$  计算第i测

段的上测点、下测点之间预估的工具面角增量, 其中,  $\Delta\omega_{12}$  为第2测段工具面角的增量,  $\omega_{1e}$  为第1个测点处工具面角的预估值,  $\omega_{2e}$  为第2个测点处工具面角的预估值。

[0050] 与现有技术相比, 本发明的有益效果是: 首先根据井眼轨迹第0个测点和第1个测点的测斜数据按照目前常用的测斜计算方法(最小曲率法或曲率半径法)计算第1个测段的坐标增量; 然后假设从第2个测段到倒数第2个测段的曲率和挠率均为线性变化, 先由第0个测点、第1个测点和第2个测点的测斜数据计算第1个测点处的曲率、挠率和工具面角, 并以第2个测点处的井斜角和方位角为约束确定第2个测段曲率和挠率的变化率, 在此基础上, 数值积分得到第2个测段的坐标增量, 以此类推, 直至计算出倒数第2个测段的坐标增量; 再次按照目前常用的测斜计算方法计算最后一个测段的坐标增量; 最后根据第0个测点处的全轨迹参数和各测段的坐标增量就可以计算出全部测点处的全轨迹参数; 能够根据所计算测段及其前、后两个测段的井斜角、方位角变化规律, 自动优选出与所计算测段井眼轨迹形状较为接近的曲线特征参数, 自动拟合出与实钻井眼轨迹最接近的曲线类型并进行测斜计算, 避免了由于假定的曲线类型与实钻井眼轨迹曲线不匹配造成的误差, 显著提高了井眼轨迹测斜计算的精度, 在救援井、连通井、平行水平井和密集井眼防碰等方面有重要意义。

## 附图说明

[0051] 图1为本发明实施例的一种井眼轨迹自适应测斜计算方法的流程示意图。

## 具体实施方式

[0052] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚, 下面对本发明实施方式作进一步地详细描述:

[0053] 下面将结合图1对本发明实施例的一种井眼轨迹自适应测斜计算方法进行详细的说明。

[0054] 参考图1所示, 本发明实施例提供一种井眼轨迹自适应测斜计算方法

[0055] 步骤110: 接收测斜数据并对其进行处理, 根据测斜数据对测点和测段进行编号。

[0056] 具体的, 第1个井斜不为0的测点为第1测点, 其后测点编号依次增加, 直至最后一个测点; 第1测点之上井深比第1测点井深小25m处为第0测点, 若第1测点井深小于25m, 则第0测点为井口。并且第0个测点和第1个测点之间的测段为第1个测段, 以此类推, 第i-1个测

点和第*i*个测点之间的测段为第*i*个测段,其中,*i*为大于等于1的正整数。

[0057] 示例的,第1个井斜不为0的测点为第1测点,其后依次为第2测点、第3测点……,直至最后一个测点为第*m*测点;第1个测点之上井深比第1测点井深小25m处为第0测点,若第1测点井深小于25m,则第0测点为井口,即

$$[0058] \quad L_0 = \begin{cases} L_1 - 25 & (L_1 > 25m) \\ 0 & (L_1 \leq 25m) \end{cases} \quad (1)$$

[0059] 其中, $L_0$ 为第0测点井深, $m$ ;  $L_1$ 为第1测点井深, $m$ 。

[0060] 第0测点的其他参数为:

$$[0061] \quad \begin{cases} \alpha_0 = 0 \\ \varphi_0 = 0 \\ D_0 = L_0 \\ L_{p0} = 0 \\ N_0 = 0 \\ E_0 = 0 \\ S_0 = 0 \\ \theta_0 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

[0062] 其中, $\alpha_0$ 为第0测点井斜角, $^\circ$ ;  $\varphi_0$ 为第0测点方位角, $^\circ$ ;  $D_0$ 为第0测点垂深, $m$ ;  $L_{p0}$ 为第0测点水平投影长度, $m$ ;  $N_0$ 为第0测点N坐标, $m$ ;  $E_0$ 为第0测点E坐标, $m$ ;  $S_0$ 为第0测点闭合距, $m$ ;  $\theta_0$ 为第0测点闭合方位角, $^\circ$ 。

[0063] 在测点编号的基础上,第*i*-1个测点和第*i*个测点之间的测段为第*i*个测段,*i*可以从1变化到*m*。

[0064] 步骤120:采用常规测斜计算方法计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量。

[0065] 其中,坐标增量包括垂深增量、水平投影长度增量、N坐标增量和E坐标增量。

[0066] 根据公式  $\gamma_{01} = \arccos[\cos\alpha_0 \cdot \cos\alpha_1 + \sin\alpha_0 \cdot \sin\alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_0)]$  计算第1测段的狗腿角,其中, $\gamma_{01}$ 为第1测段的狗腿角, $^\circ$ ;  $\alpha_0$ 为第0测点井斜角, $^\circ$ ;  $\alpha_1$ 为第1测点井斜角, $^\circ$ ;  $\varphi_0$ 为第0测点方位角, $^\circ$ ;  $\varphi_1$ 为第1测点方位角, $^\circ$ ;

[0067] 若第1测段的狗腿角等于零,则采用如下公式计算第1测段下测点相对上测点的坐

$$\text{标增量} \begin{cases} \Delta D_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \cos\alpha_0 \\ \Delta L_{p01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \\ \Delta N_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 \\ \Delta E_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 \end{cases}, \text{其中, } L_0 \text{ 为第0测点井深, } m; L_1 \text{ 为第1测点井}$$

深, $m$ ;  $\Delta D_{01}$ 为第1测段垂深的增量, $m$ ;  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量, $m$ ;  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量, $m$ ;  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量, $m$ ;

[0068] 若第1测段的狗腿角大于零,则采用如下公式计算第1测段下测点相对上测点的坐标增量

$$[0069] \quad \begin{cases} \Delta D_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\cos\alpha_0 + \cos\alpha_1) \\ \Delta L_{p01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 + \sin\alpha_1) \\ \Delta N_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \cos\varphi_1) \\ \Delta E_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \sin\varphi_1) \end{cases}, \text{其中, } \Delta D_{01}$$

为第1测段垂深的增量,m;  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量,m;  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量,m;  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量,m;  $R_{01}$ 为第1测段圆弧的曲率半径,m。

$$[0070] \quad \gamma_{01} = \arccos[\cos\alpha_0 \cdot \cos\alpha_1 + \sin\alpha_0 \cdot \sin\alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_0)] \quad (3)$$

[0071] 当  $\gamma_{01} = 0$  时:

$$[0072] \quad \begin{cases} \Delta D_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \cos\alpha_0 \\ \Delta L_{p01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \\ \Delta N_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 \\ \Delta E_{01} = (L_1 - L_0) \cdot \sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 \end{cases} \quad (4)$$

[0073] 当  $\gamma_{01} > 0$  时:

$$[0074] \quad R_{01} = (L_1 - L_0) / \gamma_{01} \quad (5)$$

$$[0075] \quad \begin{cases} \Delta D_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\cos\alpha_0 + \cos\alpha_1) \\ \Delta L_{p01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 + \sin\alpha_1) \\ \Delta N_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \cos\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \cos\varphi_1) \\ \Delta E_{01} = R_{01} \cdot \tan(\gamma_{01}/2) \cdot (\sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi_0 + \sin\alpha_1 \cdot \sin\varphi_1) \end{cases} \quad (6)$$

[0076] 其中,  $\gamma_{01}$ 为第1测段的狗腿角,°;  $\alpha_1$ 为第1测点井斜角,°;  $\varphi_1$ 为第1测点方位角,°;  $\Delta D_{01}$ 为第1测段垂深的增量,m;  $\Delta L_{p01}$ 为第1测段水平投影长度的增量,m;  $\Delta N_{01}$ 为第1测段N坐标的增量,m;  $\Delta E_{01}$ 为第1测段E坐标的增量,m;  $R_{01}$ 为第1测段圆弧的曲率半径,m;其他参数同前。

[0077] 步骤130:根据第1测段及第2测段和第3测段计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量,并以此类推计算其他测段的下测点相对上测点的坐标增量,直至计算出倒数第2个测段的下测点相对上测点的坐标增量。

[0078] 具体的,步骤130包括如下子步骤:

[0079] (1)根据第1测段和第2测段对应的三测点井深、井斜角和方位角,计算第2测段上测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值;

[0080] 根据公式  $k_{1e} = \sqrt{k_{\alpha 1}^2 + k_{\varphi 1}^2 \sin^2 \alpha_1}$  计算第2测段上测点的井眼曲率的预估值,其中, $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角, $k_{1e}$ 为第1个测点处井眼曲率的预估值, $k_{\alpha 1}$ 为第1个测点处的井斜变化率, $k_{\varphi 1}$ 为第1个测点处的方位变化率;

[0081] 根据公式  $\tau_{1e} = \frac{k_{\alpha 1} k_{\varphi 1} - k_{\varphi 1} k_{\alpha 1}}{k_{1e}^2} \sin \alpha_1 + k_{\varphi 1} \left( 1 + \frac{k_{\alpha 1}^2}{k_{1e}^2} \right) \cos \alpha_1$  计算第2测段上测点的挠率的预估值,其中, $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角, $k_{1e}$ 为第1个测点处井眼曲率的预估值,

$k_{\alpha 1}$ 为第1个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 1}$ 为第1个测点处的方位变化率,  $\dot{k}_{\alpha 1}$ 为第1个测点处井斜变化率的变化率,  $\dot{k}_{\varphi 1}$ 为第1个测点处方位变化率的变化率,  $\tau_{1e}$ 为第1个测点处井眼挠率的预估值;

$$[0082] \quad \text{根据公式} \omega_{1e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \text{sgn}(\Delta\varphi_{01}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos\alpha_0 - \cos\alpha_1 \cos\gamma_{01}}{\sin\alpha_1 \sin\gamma_{01}} \right) \\ + \text{sgn}(\Delta\varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos\alpha_1 \cos\gamma_{12} - \cos\alpha_2}{\sin\alpha_1 \sin\gamma_{12}} \right) \end{array} \right] \text{计算第2测段上}$$

测点的工具面角的预估值, 其中,  $\omega_{1e}$ 为第1个测点处工具面角的预估值,  $\Delta\varphi_{01}$ 为第1测段的方位角增量,  $\Delta\varphi_{12}$ 为第2测段的方位角增量,  $\alpha_1$ 为第1测点的井斜角,  $\alpha_0$ 为第0测点的井斜角,  $\alpha_2$ 为第2测点的井斜角,  $\gamma_{01}$ 为第1测段的狗腿角,  $\gamma_{12}$ 为第2测段的狗腿角。

[0083] 具体的, 采用如下公式根据第1测段和第2测段对应的三测点井深、井斜角和方位角, 计算第2测段上测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值。

$$[0084] \quad \Delta\varphi_{01} = \begin{cases} (\varphi_1 - \varphi_0 + 2\pi) & (\varphi_1 - \varphi_0 < -\pi) \\ (\varphi_1 - \varphi_0) & (-\pi \leq \varphi_1 - \varphi_0 \leq \pi) \\ (\varphi_1 - \varphi_0 - 2\pi) & (\varphi_1 - \varphi_0 > \pi) \end{cases} \quad (7)$$

$$[0085] \quad \Delta\varphi_{12} = \begin{cases} (\varphi_2 - \varphi_1 + 2\pi) & (\varphi_2 - \varphi_1 < -\pi) \\ (\varphi_2 - \varphi_1) & (-\pi \leq \varphi_2 - \varphi_1 \leq \pi) \\ (\varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi) & (\varphi_2 - \varphi_1 > \pi) \end{cases} \quad (8)$$

$$[0086] \quad \gamma_{01} = \cos^{-1}[\cos\alpha_0 \cos\alpha_1 + \sin\alpha_0 \sin\alpha_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_0)] \quad (9)$$

$$[0087] \quad \gamma_{12} = \cos^{-1}[\cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)] \quad (10)$$

$$[0088] \quad k_{\alpha 01} = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{L_1 - L_0} \quad (11)$$

$$[0089] \quad k_{\varphi 01} = \frac{\Delta\varphi_{01}}{L_1 - L_0} \quad (12)$$

$$[0090] \quad k_{\alpha 12} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L_2 - L_1} \quad (13)$$

$$[0091] \quad k_{\varphi 12} = \frac{\Delta\varphi_{12}}{L_2 - L_1} \quad (14)$$

$$[0092] \quad k_{\alpha 1} = \frac{k_{\alpha 01}(L_2 - L_1) + k_{\alpha 12}(L_1 - L_0)}{L_2 - L_0} \quad (15)$$

$$[0093] \quad k_{\varphi 1} = \frac{k_{\varphi 01}(L_2 - L_1) + k_{\varphi 12}(L_1 - L_0)}{L_2 - L_0} \quad (16)$$

$$[0094] \quad \dot{k}_{\alpha 1} = \frac{k_{\alpha 12} - k_{\alpha 01}}{(L_2 - L_0)/2} \quad (17)$$

$$[0095] \quad \dot{k}_{\varphi 1} = \frac{k_{\varphi 12} - k_{\varphi 01}}{(L_2 - L_0)/2} \quad (18)$$

$$[0096] \quad k_{ie} = \sqrt{k_{\alpha i}^2 + k_{\varphi i}^2 \sin^2 \alpha_i} \quad (19)$$

$$[0097] \quad \tau_{1e} = \frac{k_{\alpha 1} \dot{k}_{\varphi 1} - k_{\varphi 1} \dot{k}_{\alpha 1}}{k_{1e}^2} \sin \alpha_1 + k_{\varphi 1} \left( 1 + \frac{k_{\alpha 1}^2}{k_{1e}^2} \right) \cos \alpha_1 \quad (20)$$

$$[0098] \quad \omega_{1e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \operatorname{sgn}(\Delta \varphi_{01}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1 \cos \gamma_{01}}{\sin \alpha_1 \sin \gamma_{01}} \right) \\ + \operatorname{sgn}(\Delta \varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_1 \cos \gamma_{12} - \cos \alpha_2}{\sin \alpha_1 \sin \gamma_{12}} \right) \end{array} \right] \quad (21)$$

[0099] 其中,  $\Delta \varphi_{01}$  为第1测段的方位角增量,  $^\circ$ ;  $\Delta \varphi_{12}$  为第2测段的方位角增量,  $^\circ$ ;  $\gamma_{12}$  为第2测段的狗腿角,  $^\circ$ ;  $k_{\alpha 01}$  为第1测段的平均井斜变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\varphi 01}$  为第1测段的平均方位变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\alpha 12}$  为第2测段的平均井斜变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\varphi 12}$  为第2测段的平均方位变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\alpha 1}$  为第1个测点处的井斜变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\varphi 1}$  为第1个测点处的方位变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $\dot{k}_{\alpha 1}$  为第1个测点处井斜变化率的变化率,  $^\circ/\text{m}^2$ ;  $\dot{k}_{\varphi 1}$  为第1个测点处方位变化率的变化率,  $^\circ/\text{m}^2$ ;  $k_{1e}$  为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $^\circ/\text{m}$ ;  $\tau_{1e}$  为第1个测点处井眼挠率的预估值,  $^\circ/\text{m}$ ;  $\omega_{1e}$  为第1个测点处工具面角的预估值,  $^\circ$ ; 其它参数同前。

[0100] (2) 根据第2测段和第3测段对应的三测点井深、井斜角和方位角, 计算第2测段下测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值。

[0101] 根据公式  $k_{2e} = \sqrt{k_{\alpha 2}^2 + k_{\varphi 2}^2 \sin^2 \alpha_2}$  计算第2测段下测点的井眼曲率的预估值, 其中,  $\alpha_2$  为第2测点的井斜角,  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 2}$  为第2个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 2}$  为第2个测点处的方位变化率;

[0102] 根据公式  $\tau_{2e} = \frac{k_{\alpha 2} \dot{k}_{\varphi 2} - k_{\varphi 2} \dot{k}_{\alpha 2}}{k_{2e}^2} \sin \alpha_2 + k_{\varphi 2} \left( 1 + \frac{k_{\alpha 2}^2}{k_{2e}^2} \right) \cos \alpha_2$  计算第2测段下测点的挠率的预估值, 其中,  $\alpha_2$  为第2测点的井斜角,  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{\alpha 2}$  为第2个测点处的井斜变化率,  $k_{\varphi 2}$  为第2个测点处的方位变化率,  $\dot{k}_{\alpha 2}$  为第2个测点处井斜变化率的变化率,  $\dot{k}_{\varphi 2}$  为第2个测点处方位变化率的变化率,  $\tau_{2e}$  为第2个测点处井眼挠率的预估值;

[0103] 根据公式  $\omega_{2e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \operatorname{sgn}(\Delta \varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 \cos \gamma_{12}}{\sin \alpha_2 \sin \gamma_{12}} \right) \\ + \operatorname{sgn}(\Delta \varphi_{23}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha_2 \cos \gamma_{23} - \cos \alpha_3}{\sin \alpha_2 \sin \gamma_{23}} \right) \end{array} \right]$  计算第1测段上

测点的工具面角的预估值, 其中,  $\omega_{2e}$  为第2个测点处工具面角的预估值,  $\Delta \varphi_{02}$  为第2测段的方位角增量,  $\Delta \varphi_{23}$  为第3测段的方位角增量,  $\alpha_2$  为第3测点的井斜角,  $\alpha_1$  为第1测点的井斜角,  $\alpha_{23}$  为第4测点的井斜角,  $\gamma_{12}$  为第2测段的狗腿角,  $\gamma_{23}$  为第3测段的狗腿角。

[0104] 具体的, 采用如下公式根据第2测段和第3测段对应的三测点井深、井斜角和方位

角,计算第2测段下测点的井眼曲率、挠率和工具面角预估值。

$$[0105] \quad \Delta\varphi_{23} = \begin{cases} (\varphi_3 - \varphi_2 + 2\pi) & (\varphi_3 - \varphi_2 < -\pi) \\ (\varphi_3 - \varphi_2) & (-\pi \leq \varphi_3 - \varphi_2 \leq \pi) \\ (\varphi_3 - \varphi_2 - 2\pi) & (\varphi_3 - \varphi_2 > \pi) \end{cases} \quad (22)$$

$$[0106] \quad \gamma_{23} = \cos^{-1}[\cos\alpha_2\cos\alpha_3 + \sin\alpha_2\sin\alpha_3\cos(\varphi_3 - \varphi_2)] \quad (23)$$

$$[0107] \quad k_{\alpha 23} = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{L_3 - L_2} \quad (24)$$

$$[0108] \quad k_{\varphi 23} = \begin{cases} \frac{(\varphi_3 - \varphi_2 + 2\pi)}{L_3 - L_2} & (\varphi_3 - \varphi_2 < -\pi) \\ \frac{(\varphi_3 - \varphi_2)}{L_3 - L_2} & (-\pi \leq \varphi_3 - \varphi_2 \leq \pi) \\ \frac{(\varphi_3 - \varphi_2 - 2\pi)}{L_3 - L_2} & (\varphi_3 - \varphi_2 > \pi) \end{cases} \quad (25)$$

$$[0109] \quad k_{\alpha 2} = \frac{k_{\alpha 12}(L_3 - L_2) + k_{\alpha 23}(L_2 - L_1)}{L_3 - L_1} \quad (26)$$

$$[0110] \quad k_{\varphi 2} = \frac{k_{\varphi 12}(L_3 - L_2) + k_{\varphi 23}(L_2 - L_1)}{L_3 - L_1} \quad (27)$$

$$[0111] \quad \dot{k}_{\alpha 2} = \frac{k_{\alpha 23} - k_{\alpha 12}}{(L_3 - L_1)/2} \quad (28)$$

$$[0112] \quad \dot{k}_{\varphi 2} = \frac{k_{\varphi 23} - k_{\varphi 12}}{(L_3 - L_1)/2} \quad (29)$$

$$[0113] \quad k_{2e} = \sqrt{k_{\alpha 2}^2 + k_{\varphi 2}^2 \sin^2 \alpha_2} \quad (30)$$

$$[0114] \quad \tau_{2e} = \frac{k_{\alpha 2} \dot{k}_{\varphi 2} - k_{\varphi 2} \dot{k}_{\alpha 2}}{k_{2e}^2} \sin \alpha_2 + k_{\varphi 2} \left(1 + \frac{k_{\alpha 2}^2}{k_{2e}^2}\right) \cos \alpha_2 \quad (31)$$

$$[0115] \quad \omega_{2e} = \frac{1}{2} \left[ \begin{aligned} & \operatorname{sgn}(\Delta\varphi_{12}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 \cos\gamma_{12}}{\sin\alpha_2 \sin\gamma_{12}} \right) \\ & + \operatorname{sgn}(\Delta\varphi_{23}) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\cos\alpha_2 \cos\gamma_{23} - \cos\alpha_3}{\sin\alpha_2 \sin\gamma_{23}} \right) \end{aligned} \right] \quad (32)$$

[0116] 式中,  $\Delta\varphi_{23}$  为第3测段的方位角增量,  $^\circ$ ;  $\gamma_{23}$  为第3测段的狗腿角,  $^\circ$ ;  $k_{\alpha 23}$  为第3测段的平均井斜变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\varphi 23}$  为第3测段的平均方位变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\alpha 2}$  为第2个测点处的井斜变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $k_{\varphi 2}$  为第2个测点处的方位变化率,  $^\circ/\text{m}$ ;  $\dot{k}_{\alpha 2}$  为第2个测点处井斜变化率的变化率,  $^\circ/\text{m}^2$ ;  $\dot{k}_{\varphi 2}$  为第2个测点处方位变化率的变化率,  $^\circ/\text{m}^2$ ;  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值,  $^\circ/\text{m}$ ;  $\tau_{2e}$  为第2个测点处井眼挠率的预估值,  $^\circ/\text{m}$ ;  $\omega_{2e}$  为第2个测点处工具面角的预估值,  $^\circ$ ; 其它参数同前。

[0117] (3) 计算第2测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率、挠率的平均变化率和工具面角增量。

[0118] 根据公式  $A_{k12} = \frac{k_{2e}-k_{1e}}{L_2-L_1}$  计算第i测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率, 其中,  $A_{k12}$  为第2测段井眼曲率的平均变化率,  $L_1$  为第1测点井深,  $L_2$  为第2测点井深,  $k_{1e}$  为第1个测点处井眼曲率的预估值,  $k_{2e}$  为第2个测点处井眼曲率的预估值;

[0119] 根据公式  $A_{\tau12} = \frac{\tau_{2e}-\tau_{1e}}{L_2-L_1}$  计算第i测段的上测点、下测点之间预估的挠率的平均变化率, 其中,  $A_{\tau12}$  为第2测段井眼挠率的平均变化率,  $\tau_{1e}$  为第1个测点处井眼挠率的预估值,  $\tau_{2e}$  为第2个测点处井眼挠率的预估值;

[0120] 根据公式  $\Delta\omega_{12} = \begin{cases} (\omega_{2e} - \omega_{1e} + 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} < -\pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e}) & (-\pi \leq \omega_{2e} - \omega_{1e} \leq \pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e} - 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} > \pi) \end{cases}$  计算第i测

段的上测点、下测点之间预估的工具面角增量, 其中,  $\Delta\omega_{12}$  为第2测段工具面角的增量,  $\omega_{1e}$  为第1个测点处工具面角的预估值,  $\omega_{2e}$  为第2个测点处工具面角的预估值。

[0121] 具体的, 计算第2测段的上测点、下测点之间预估的井眼曲率、挠率的平均变化率和工具面角增量的过程如下:

$$[0122] \quad A_{k12} = \frac{k_{2e}-k_{1e}}{L_2-L_1} \quad (33)$$

$$[0123] \quad A_{\tau12} = \frac{\tau_{2e}-\tau_{1e}}{L_2-L_1} \quad (34)$$

$$[0124] \quad \Delta\omega_{12} = \begin{cases} (\omega_{2e} - \omega_{1e} + 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} < -\pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e}) & (-\pi \leq \omega_{2e} - \omega_{1e} \leq \pi) \\ (\omega_{2e} - \omega_{1e} - 2\pi) & (\omega_{2e} - \omega_{1e} > \pi) \end{cases} \quad (35)$$

[0125] 式中,  $A_{k12}$  为第2测段井眼曲率的平均变化率,  $^{\circ}/m^2$ ;  $A_{\tau12}$  为第2测段井眼挠率的平均变化率,  $^{\circ}/m^2$ ;  $\Delta\omega_{12}$  为第2测段工具面角的增量,  $^{\circ}$ ; 其它参数同前。

[0126] (4) 以第2测段上测点预估的井眼曲率、挠率和工具面角为参考值, 以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率和工具面角增量的  $\pm 10\%$  为波动范围, 确定第2测段的井眼曲率、挠率和工具面角的取值范围。

[0127] 具体的, 以第2测段上测点(第1测点)处的井眼曲率、挠率和工具面角预估值为参考, 在参考值上、下波动该测段相应预估值变化范围的  $10\%$  作为上、下限, 即有

$$[0128] \quad k_{1max} = k_{1e} + A_{k12} \cdot (L_2 - L_1) \cdot 10\% \quad (36)$$

$$[0129] \quad k_{1min} = k_{1e} - A_{k12} \cdot (L_2 - L_1) \cdot 10\% \quad (37)$$

$$[0130] \quad \tau_{1max} = \tau_{1e} + A_{\tau12} \cdot (L_2 - L_1) \cdot 10\% \quad (38)$$

$$[0131] \quad \tau_{1min} = \tau_{1e} - A_{\tau12} \cdot (L_2 - L_1) \cdot 10\% \quad (39)$$

$$[0132] \quad \omega_{1max} = \omega_{1e} + \Delta\omega_{12} \cdot 10\% \quad (40)$$

$$[0133] \quad \omega_{1min} = \omega_{1e} - \Delta\omega_{12} \cdot 10\% \quad (41)$$

[0134] 式中,  $k_{1max}$  为第1测点处井眼曲率搜索区间的上限,  $^{\circ}/m$ ;  $k_{1min}$  为第1测点处井眼曲率搜索区间的下限,  $^{\circ}/m$ ;  $\tau_{1max}$  为第1测点处井眼挠率搜索区间的上限,  $^{\circ}/m$ ;  $\tau_{1min}$  为第1测点处井眼挠率搜索区间的下限,  $^{\circ}/m$ ;  $\omega_{1max}$  为第1个测点处工具面角搜索区间的上限,  $^{\circ}$ ;  $\omega_{1min}$  为第1个测点处工具面角搜索区间的下限,  $^{\circ}$ ; 其它参数同前。



[0135] (5) 以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率的平均变化率为参考值,以参考值上、下波动5%确定第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围。

[0136] 具体的,以第2测段上测点、下测点之间的井眼曲率、挠率的平均变化率为参考值,根据如下公式以参考值上、下波动5%确定第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围。

$$[0137] \quad A_{k_{\max}} = 1.05 \cdot A_{k_{12}} \quad (42)$$

$$[0138] \quad A_{k_{\min}} = 0.95 \cdot A_{k_{12}} \quad (43)$$

$$[0139] \quad A_{\tau_{\max}} = 1.05 \cdot A_{\tau_{12}} \quad (44)$$

$$[0140] \quad A_{\tau_{\min}} = 0.95 \cdot A_{\tau_{12}} \quad (45)$$

[0141] 式中, $A_{k_{\max}}$ 为第2测段井眼曲率变化率搜索区间上限, $^{\circ}/m$ ;  $A_{k_{\min}}$ 为第2测段井眼曲率变化率搜索区间下限, $^{\circ}/m$ ;  $A_{\tau_{\max}}$ 为第2测段井眼挠率变化率搜索区间上限, $^{\circ}/m$ ;  $A_{\tau_{\min}}$ 为第2测段井眼挠率变化率搜索区间下限, $^{\circ}/m$ ;其它参数同前。

[0142] (6) 在确定的第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围内,针对第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率,计算第2测段下测点的井斜角、方位角、井眼曲率和挠率。

[0143] 具体的,在确定的第2测段的井眼曲率变化率、挠率变化率的取值范围内,针对第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率,采用如下公式计算第2测段下测点的井斜角、方位角、井眼曲率、挠率和工具面角等参数。具体计算过程如下:

[0144] ①将该测段分成若干段 $n$ ,段长为 $ds$ ;

[0145] ②第1段的起点 $s=0$ 处的参数为

$$[0146] \quad \alpha(0) = \alpha_1 \quad (46)$$

$$[0147] \quad \varphi(0) = \varphi_1 \quad (47)$$

$$[0148] \quad k(0) = k_{1c} \quad (48)$$

$$[0149] \quad \tau(0) = \tau_{1c} \quad (49)$$

$$[0150] \quad \omega(0) = \omega_{1c} \quad (50)$$

[0151] 式中, $k_{1c}$ 、 $\tau_{1c}$ 、 $\omega_{1c}$ 、 $A_{kc}$ 、 $A_{\tau c}$ 分别为第2测段上测点处的井眼曲率、井眼挠率、工具面角和第2测段井眼曲率变化率、井眼挠率在其搜索区间内的某一取值; $\alpha(0)$ 、 $\varphi(0)$ 、 $k(0)$ 、 $\tau(0)$ 、 $\omega(0)$ 分别为第2测段上距离上测点沿井深长度 $s=0$ 处的井斜角、方位角、井眼曲率、井眼挠率和工具面角,当 $s$ 取不同值时就是不同深度处的相应参数。

[0152] ③由 $s=i \cdot ds$ 处的参数计算 $s=(i+1) \cdot ds$ 处的参数

$$[0153] \quad \alpha((i+1) \cdot ds) = \alpha(i \cdot ds) + k(i \cdot ds) \cdot \cos \omega(i \cdot ds) \cdot ds \quad (51)$$

$$[0154] \quad \varphi((i+1) \cdot ds) = \varphi(i \cdot ds) + k(i \cdot ds) \cdot \sin \omega(i \cdot ds) / \sin \alpha(i \cdot ds) \cdot ds \quad (52)$$

$$[0155] \quad k((i+1) \cdot ds) = k(i \cdot ds) + A_{kc} \cdot ds \quad (53)$$

$$[0156] \quad \tau((i+1) \cdot ds) = \tau(i \cdot ds) + A_{\tau c} \cdot ds \quad (54)$$

$$[0157] \quad \omega((i+1) \cdot ds) = \omega(i \cdot ds) + [\tau(i \cdot ds) - k(i \cdot ds) \cdot \sin \omega(i \cdot ds) / \sin \alpha(i \cdot ds) \cdot ds] \cdot \cos \alpha(i \cdot ds) \cdot ds \quad (55)$$

[0158] ( $i=0, \dots, n-1$ )

[0159] ④第2测段的下测点(第2测点)处的参数即为第 $n$ 段终点 $s=n \cdot ds$ 处的参数

$$[0160] \quad \alpha_{2c} = \alpha (n \cdot ds) \quad (56)$$

$$[0161] \quad \varphi_{2c} = \varphi(n \cdot ds) \quad (57)$$

$$[0162] \quad k_{2c} = k (n \cdot ds) \quad (58)$$

$$[0163] \quad \tau_{2c} = \tau (n \cdot ds) \quad (59)$$

$$[0164] \quad \omega_{2c} = \omega (n \cdot ds) \quad (60)$$

[0165] 式中,  $\alpha_{2c}$ 、 $\varphi_{2c}$ 、 $k_{2c}$ 、 $\tau_{2c}$ 、 $\omega_{2c}$  分别为根据第2测段上测点处的一组取值 ( $k_{1c}$ ,  $\tau_{1c}$ ,  $\omega_{1c}$ ,  $A_{kc}$ ,  $A_{\tau c}$ ) 计算出的下测点处井斜角、方位角、井眼曲率、井眼挠率、工具面角。

[0166] 示例的, 先将第2测段分成若干段, 由第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率, 按照公式 (46) - (50) 确定迭代初值, 按照公式 (51) - (55) 的迭代格式由上一点参数计算下一点参数, 直至第2测段的下测点, 即可计算得到下测点的井斜角、方位角、井眼曲率和挠率。

[0167] (7) 计算第2测段下测点处井斜角和方位角的计算值与实测值的综合角度偏差和第2测段上测点、下测点处曲率、挠率的计算值和预估值值的综合偏差, 在满足第2测段下测点角度偏差小于规定值 0.0002 的前提下, 按照第2测段上测点、下测点处曲率、挠率的综合偏差最小原则确定第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率最优值。

[0168] 采用如下公式计算针对任一组取值 ( $k_{1c}$ ,  $\tau_{1c}$ ,  $\omega_{1c}$ ,  $A_{kc}$ ,  $A_{\tau c}$ ) 的误差值  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ 。

$$[0169] \quad \Delta_1 = \sqrt{(\alpha_{2c} - \alpha_2)^2 + (\varphi_{2c} - \varphi_2)^2 \sin^2 \alpha_2} \quad (61)$$

$$[0170] \quad \Delta_2 = \sqrt{(k_{1c} - k_{1e})^2 + (k_{2c} - k_{2e})^2 + (\tau_{1c} - \tau_{1e})^2 + (\tau_{2c} - \tau_{2e})^2} \quad (62)$$

[0171] (8) 根据第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和第2测段曲率变化率、挠率变化率最优值, 计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量。

[0172] 具体的, 在给定的取值范围内, 满足  $\Delta_1 < 0.0002$  且  $\Delta_2$  最小的一组取值, ( $k_{1c}$ ,  $\tau_{1c}$ ,  $\omega_{1c}$ ,  $A_{kc}$ ,  $A_{\tau c}$ ) 确定为最优值 ( $k_{1opt}$ ,  $\tau_{1opt}$ ,  $\omega_{1opt}$ ,  $A_{kopt}$ ,  $A_{\tau opt}$ )。

[0173] 之后以第2测段上测点 (第1测点) 的最优值 ( $k_{1opt}$ ,  $\tau_{1opt}$ ,  $\omega_{1opt}$ ,  $A_{kopt}$ ,  $A_{\tau opt}$ ) 计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量。具体的计算过程如下:

[0174] ① 将该测段分成若干段  $n$ , 段长为  $ds$ ;

[0175] ② 第1段的起点  $s=0$  处的参数为

$$[0176] \quad \alpha(0) = \alpha_1 \quad (63)$$

$$[0177] \quad \varphi(0) = \varphi_1 \quad (64)$$

$$[0178] \quad k(0) = k_{1opt} \quad (65)$$

$$[0179] \quad \tau(0) = \tau_{1opt} \quad (66)$$

$$[0180] \quad \omega(0) = \omega_{1opt} \quad (67)$$

[0181] ③ 由  $s=i \cdot ds$  处的参数计算  $s=(i+1) \cdot ds$  处的参数

$$[0182] \quad \alpha((i+1) \cdot ds) = \alpha(i \cdot ds) + k(i \cdot ds) \cdot \cos \omega(i \cdot ds) \cdot ds \quad (68)$$

$$[0183] \quad \varphi((i+1) \cdot ds) = \varphi(i \cdot ds) + k(i \cdot ds) \cdot \sin \omega(i \cdot ds) / \sin \alpha(i \cdot ds) \cdot ds \quad (69)$$

$$[0184] \quad k((i+1) \cdot ds) = k(i \cdot ds) + A_{kopt} \cdot ds \quad (70)$$

$$[0185] \quad \tau((i+1) \cdot ds) = \tau(i \cdot ds) + A_{\tau opt} \cdot ds \quad (71)$$

$$[0186] \quad \omega((i+1) \cdot ds) = \omega(i \cdot ds) + [\tau(i \cdot ds) - k(i \cdot ds) \cdot \sin \omega(i \cdot ds) / \sin \alpha_i \cdot ds \cdot \cos \alpha_i \cdot ds \cdot ds] \quad (72)$$

$$[0187] \quad (i=0, \dots, n-1)$$

[0188] ④第2测段的下测点相对上测点的坐标增量

$$[0189] \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta D_{12} = \left[ \frac{\cos \alpha(0) + \cos \alpha(n \cdot ds)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \cos \alpha(i \cdot ds) \right] \cdot ds \\ \Delta L_{p12} = \left[ \frac{\sin \alpha(0) + \sin \alpha(n \cdot ds)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sin \alpha(i \cdot ds) \right] \cdot ds \\ \Delta N_{12} = \left[ \frac{\sin \alpha(0) \cdot \cos \varphi(0) + \sin \alpha(n \cdot ds) \cdot \cos \varphi(n \cdot ds)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sin \alpha(i \cdot ds) \cdot \sin \varphi(i \cdot ds) \right] \cdot ds \\ \Delta E_{12} = \left[ \frac{\sin \alpha(0) \cdot \sin \varphi(0) + \sin \alpha(n \cdot ds) \cdot \sin \varphi(n \cdot ds)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sin \alpha(i \cdot ds) \cdot \sin \varphi(i \cdot ds) \right] \cdot ds \end{array} \right. \quad (i=1, \dots, n-1) \quad (73)$$

[0190] 式中,  $\Delta D_{12}$  为第2测段垂深的增量, m;  $\Delta L_{p12}$  为第2测段水平投影长度的增量, m;  $\Delta N_{12}$  为第2测段N坐标的增量, m;  $\Delta E_{12}$  为第2测段E坐标的增量, m; 其他参数同前。

[0191] 示例的, 先将第2测段分成若干段, 由第2测段上测点井眼曲率、挠率、工具面角和测段曲率变化率、挠率变化率的最优值, 按照公式 (63) - (67) 确定迭代初值, 按照公式 (68) - (72) 的迭代格式由上一点参数计算下一点参数, 直至第2测段的下测点, 最后按照公式 (73) 计算第2测段下测点相对上测点的坐标增量。

[0192] 步骤140: 采用常规测斜计算方法计算最后一个测段下测点相对上测点的坐标增量;

[0193] 其中, 根据公式

$$[0194] \quad \gamma_{(m-1)m} = \arccos[\cos \alpha_{m-1} \cos \alpha_m + \sin \alpha_{m-1} \sin \alpha_m \cos(\varphi_m - \varphi_{m-1})]$$

[0195] 计算最后一个测段的狗腿角, 其中,  $\gamma_{(m-1)m}$  为第m测段的狗腿角,  $\alpha_m$  为第m测点井斜角,  $\varphi_m$  为第m测点方位角,  $\alpha_{m-1}$  为第m-1测点井斜角,  $\varphi_{m-1}$  为第m-1测点方位角;

[0196] 若第m测段的狗腿角等于零, 则采用公式

$$[0197] \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta D_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \cos \alpha_m \\ \Delta L_{p(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin \alpha_m \\ \Delta N_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin \alpha_m \cdot \cos \varphi_m \\ \Delta E_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin \alpha_m \cdot \sin \varphi_m \end{array} \right. \quad \text{计算第1测段下测点相对上测}$$

点的坐标增量, 其中,  $L_m$  为第m测点井深, m;  $L_{m-1}$  为第m-1测点井深, m;  $\Delta D_{(m-1)m}$  为第m测段垂深的增量, m;  $\Delta L_{p(m-1)m}$  为第m测段水平投影长度的增量, m;  $\Delta N_{(m-1)m}$  为第m测段N坐标的增量, m;  $\Delta E_{(m-1)m}$  为第m测段E坐标的增量, m。

[0198] 若第m测段的狗腿角大于零, 则采用公式

$$[0199] \quad \begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\cos\alpha_{m-1} + \cos\alpha_m) \\ \Delta L_{p(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} + \sin\alpha_m) \\ \Delta N_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \cos\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m) \\ \Delta E_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \sin\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m) \end{cases}$$

[0200] 计算第m测段下测点相对上测点的坐标增量,其中, $\Delta D_{(m-1)m}$ 为第m测段垂深的增量,m; $\Delta L_{p(m-1)m}$ 为第m测段水平投影长度的增量,m; $\Delta N_{(m-1)m}$ 为第m测段N坐标的增量,m; $\Delta E_{(m-1)m}$ 为第m测段E坐标的增量,m; $R_{(m-1)m}$ 为第m测段圆弧的曲率半径,m。

[0201] 示例的,具体的计算公式如下:

$$[0202] \quad \gamma_{(m-1)m} = \arccos[\cos\alpha_{m-1}\cos\alpha_m + \sin\alpha_{m-1}\sin\alpha_m\cos(\varphi_m - \varphi_{m-1})] \quad (74)$$

[0203] 当 $\gamma_{(m-1)m} = 0$ 时:

$$[0204] \quad \begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \cos\alpha_m \\ \Delta L_{p(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \\ \Delta N_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m \\ \Delta E_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) \cdot \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m \end{cases} \quad (75)$$

[0205] 当 $\gamma_{(m-1)m} > 0$ 时:

$$[0206] \quad R_{(m-1)m} = (L_m - L_{m-1}) / \gamma_{(m-1)m} \quad (76)$$

$$[0207] \quad \begin{cases} \Delta D_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\cos\alpha_{m-1} + \cos\alpha_m) \\ \Delta L_{p(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} + \sin\alpha_m) \\ \Delta N_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \cos\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \cos\varphi_m) \\ \Delta E_{(m-1)m} = R_{(m-1)m} \cdot \tan(\gamma_{(m-1)m}/2) \cdot (\sin\alpha_{m-1} \cdot \sin\varphi_{m-1} + \sin\alpha_m \cdot \sin\varphi_m) \end{cases} \quad (77)$$

[0208] 其中, $\gamma_{(m-1)m}$ 为第m测段的狗腿角, $^\circ$ ; $\alpha_{m-1}$ 为第m-1测点井斜角, $^\circ$ ; $\varphi_{m-1}$ 为第m-1测点方位角, $^\circ$ ; $\Delta D_{(m-1)m}$ 为第m测段垂深的增量,m; $\Delta L_{p(m-1)m}$ 为第m测段水平投影长度的增量,m; $\Delta N_{(m-1)m}$ 为第m测段N坐标的增量,m; $\Delta E_{(m-1)m}$ 为第m测段E坐标的增量,m; $R_{(m-1)m}$ 为第m测段圆弧的曲率半径,m;其他参数同前。

[0209] 步骤150:根据所有测段的下测点相对上测点的坐标增量,计算各测点井眼轨迹参数中的垂深、N坐标、E坐标、水平投影长度、水平位移、平移方位角和视平移。

[0210] 具体的,由上测点的参数和测段的坐标增量数据,计算下测点垂深、水平投影长度、N坐标、E坐标、水平位移、平移方位角、视平移等井眼轨迹参数。

$$[0211] \quad D_i = D_{i-1} + \Delta D_{(i-1)i} \quad (78)$$

$$[0212] \quad L_{pi} = L_{p(i-1)} + \Delta L_{p(i-1)i} \quad (79)$$

$$[0213] \quad N_i = N_{i-1} + \Delta N_{(i-1)i} \quad (80)$$

$$[0214] \quad E_i = E_{i-1} + \Delta E_{(i-1)i} \quad (81)$$

$$[0215] \quad S_i = \sqrt{N_i^2 + E_i^2} \quad (82)$$

$$[0216] \quad \theta_i = \begin{cases} \arctan\left(\frac{E_i}{N_i}\right) & (N_i > 0) \\ \frac{\pi}{2} & (N_i = 0, E_i \geq 0) \\ \frac{3\pi}{2} & (N_i = 0, E_i < 0) \\ \arctan\left(\frac{E_i}{N_i}\right) + \pi & (N_i < 0) \end{cases} \quad (83)$$

$$[0217] \quad V_i = S_i \cdot \cos(\theta_i - \theta_{TB}) \quad (85)$$

[0218] 其中,  $D_i$ 、 $L_{pi}$ 、 $N_i$ 、 $E_i$ 、 $S_i$ 、 $\theta_i$ 、 $V_i$  分别为第  $i$  测点的垂深、水平投影长度、N 坐标、E 坐标、闭合距、闭合方位角和视平移;  $D_{i-1}$ 、 $L_{p(i-1)}$ 、 $N_{i-1}$ 、 $E_{i-1}$  分别为第  $i-1$  测点的垂深、水平投影长度、N 坐标、E 坐标;  $\Delta D_{(i-1)i}$ 、 $\Delta L_{p(i-1)i}$ 、 $\Delta N_{(i-1)i}$ 、 $\Delta E_{(i-1)i}$  分别为第  $i$  测段的垂深增量、水平投影长度增量、N 坐标增量、E 坐标增量;  $\theta_{TB}$  为该井的设计方位角。

[0219] 本发明实施例的一种井眼轨迹自适应测斜计算方法首先根据井眼轨迹第 0 个测点和第 1 个测点的测斜数据按照目前常用的测斜计算方法(最小曲率法或曲率半径法)计算第 1 个测段的坐标增量;然后假设从第 2 个测段到倒数第 2 个测段的曲率和挠率均为线性变化,先由第 0 个测点、第 1 个测点和第 2 个测点的测斜数据计算第 1 个测点处的曲率、挠率和工具面角,并以第 2 个测点处的井斜角和方位角为约束确定第 2 个测段曲率和挠率的变化率,在此基础上,数值积分得到第 2 个测段的坐标增量,以此类推,直至计算出倒数第 2 个测段的坐标增量;再次按照目前常用的测斜计算方法计算最后一个测段的坐标增量;最后根据第 0 个测点处的全轨迹参数和各测段的坐标增量就可以计算出全部测点处的全轨迹参数;能够根据所计算测段及其前、后两个测段的井斜角、方位角变化规律,自动优选出与所计算测段井眼轨迹形状较为接近的曲线特征参数,自动拟合出与实钻井眼轨迹最接近的曲线类型并进行测斜计算,避免了由于假定的曲线类型与实钻井眼轨迹曲线不匹配造成的误差,显著提高了井眼轨迹测斜计算的精度,在救援井、连通井、平行水平井和密集井眼防碰等方面有重要意义。

[0220] 显然,本领域的技术人员可以对本发明实施例进行各种改动和变型而不脱离本发明实施例的精神和范围。这样,倘若本发明实施例的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

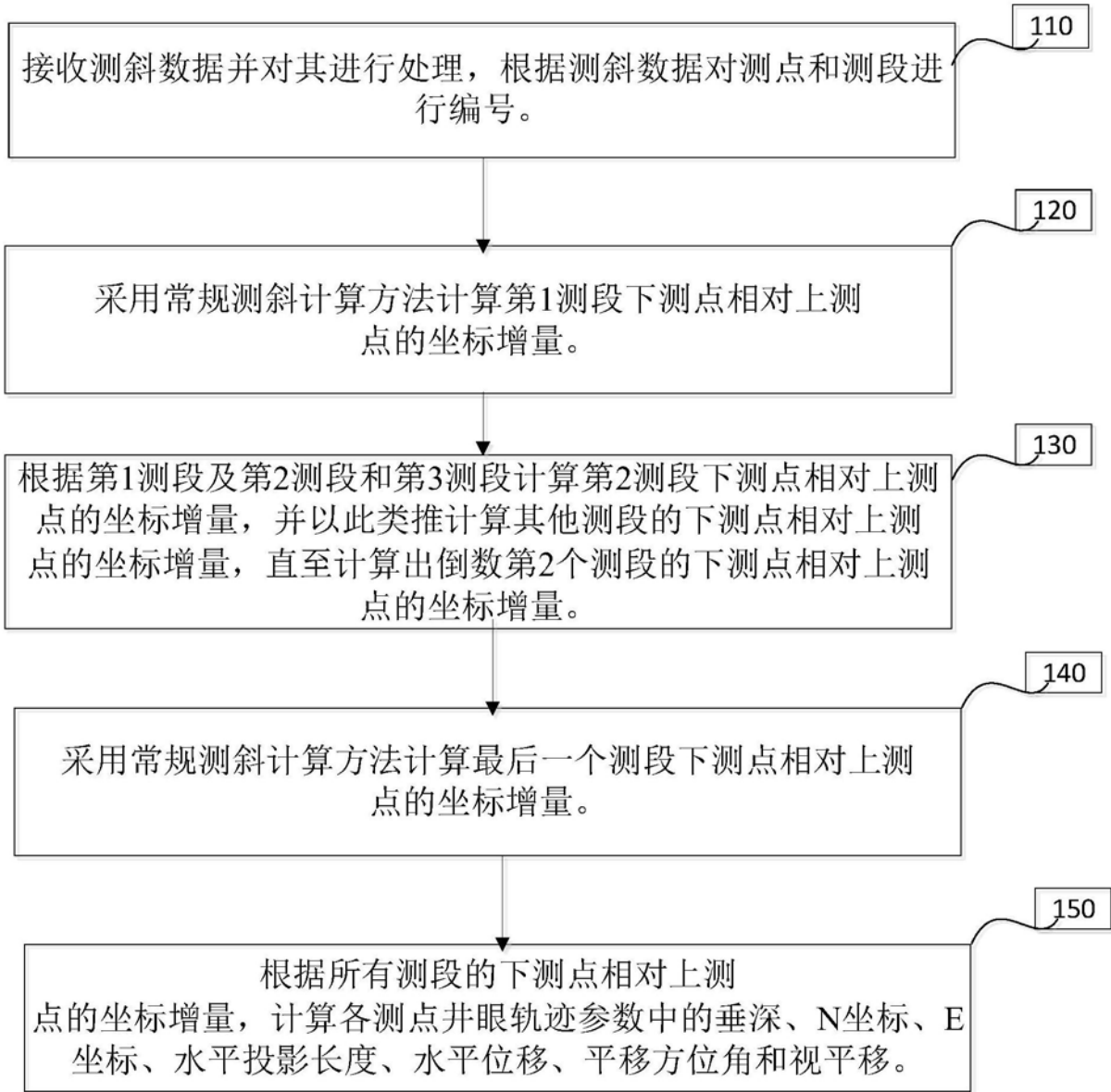


图1