



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101983276 A

(43) 申请公布日 2011. 03. 02

(21) 申请号 200880121055. 0

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2008. 12. 16

E21B 47/022 (2006. 01)

(30) 优先权数据

61/014, 362 2007. 12. 17 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 06. 17

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2008/086952 2008. 12. 16

(87) PCT申请的公布数据

W02009/079492 EN 2009. 06. 25

(71) 申请人 兰德马克绘图国际公司, 哈里伯顿
公司

地址 美国德克萨斯

(72) 发明人 罗伯特·F·米切尔

(74) 专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司 11002

代理人 张晶

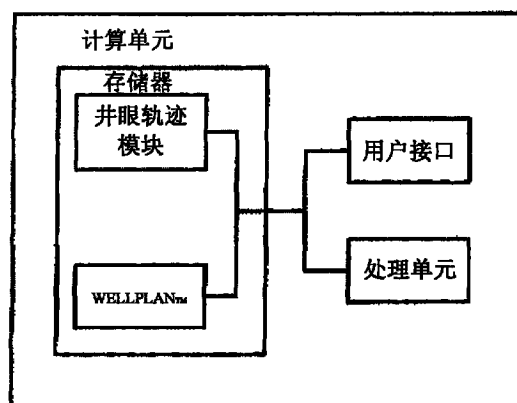
权利要求书 4 页 说明书 15 页 附图 7 页

(54) 发明名称

用于井眼轨迹建模的系统和方法

(57) 摘要

用于井眼轨迹建模的系统和方法, 可用于模拟相应钻柱轨迹以及将扭矩-阻力钻柱模型转换成全刚杆公式。



1. 一种用于井眼轨迹建模的计算机实施的方法,包括:
利用每个相应测量点处的井眼曲率、切向量和法向量计算井眼内的两个或更多个测量点之间的每个间隔的切向量插值函数;以及
利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定所述井眼轨迹。
2. 如权利要求1所述的方法,还包括:
利用每个相应测量点处的测量数据计算每个测量点处的所述切向量。
3. 如权利要求2所述的方法,其中,所述测量数据包括每个测量点处的倾角、方位角和所测量的深度。
4. 如权利要求1所述的方法,还包括:
利用每个相应测量点处的所述切向量的一阶导数、系数及另一系数计算每个测量点处的井眼曲率;以及
利用每个相应测量点处的所述切向量的一阶导数、所述系数及所述另一系数计算每个测量点处的所述法向量。
5. 如权利要求4所述的方法,其中,所述切向量的一阶导数在每个测量点都是连续的。
6. 如权利要求4所述的方法,还包括:
利用块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定法向量的方向计算每个测量点处的所述系数;以及
利用块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定副法向量的方向计算每个测量点处的所述另一系数。
7. 如权利要求6所述的方法,还包括:
利用每个相应测量点处的所述切向量、所述特定法向量和所述特定副法向量计算所述块三角矩阵。
8. 如权利要求6所述的方法,还包括:
计算每个测量点处的所述特定法向量;以及
计算每个测量点处的所述特定副法向量。
9. 如权利要求1所述的方法,还包括:
利用所述井眼轨迹计算扭矩-阻力钻柱解。
10. 如权利要求9所述的方法,还包括:
利用所述扭矩-阻力钻柱解改进所述井眼轨迹。
11. 一种具有用于井眼轨迹建模的计算机可执行指令的计算机可读介质,所述指令可执行以实施:
利用每个相应测量点处的井眼曲率、切向量和法向量计算井眼内的两个或更多个测量点之间的每个间隔的切向量插值函数;以及
利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定所述井眼轨迹。
12. 如权利要求11所述的计算机可读介质,还包括:
利用每个相应测量点处的测量数据计算每个测量点处的切向量。
13. 如权利要求12所述的计算机可读介质,其中,所述测量数据包括每个测量点处的倾角、方位角和所测量的深度。
14. 如权利要求11所述的计算机可读介质,还包括:

利用每个相应测量点处的所述切向量的一阶导数、系数及另一系数计算每个测量点处的井眼曲率；以及

利用每个相应测量点处的所述切向量的一阶导数、所述系数及所述另一系数计算每个测量点处的所述法向量。

15. 如权利要求 14 所述的计算机可读介质，其中，所述切向量的一阶导数在每个测量点都是连续的。

16. 如权利要求 14 所述的计算机可读介质，还包括：

利用块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定法向量的方向计算每个测量点处的所述系数；以及

利用块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定副法向量的方向计算每个测量点处的所述另一系数。

17. 如权利要求 16 所述的计算机可读介质，还包括：

利用每个相应测量点处的所述切向量、所述特定法向量和所述特定副法向量计算所述块三角矩阵。

18. 如权利要求 16 所述的计算机可读介质，还包括：

计算每个测量点处的所述特定法向量；以及

计算每个测量点处的所述特定副法向量。

19. 如权利要求 11 所述的计算机可读介质，还包括：

利用所述井眼轨迹计算扭矩－阻力钻柱的解。

20. 如权利要求 19 所述的计算机可读介质，还包括：

利用所述扭矩－阻力钻柱的解改进所述井眼轨迹。

21. 一种用于井眼轨迹建模的计算机实施方法，包括：

利用每个相应测量点处的测量数据计算井眼内的每个测量点处的切向量，所述井眼包括两个或更多个测量点；以及

计算每个相应测量点处的特定法向量和特定副法向量；

利用每个相应测量点处的所述切向量、所述特定法向量和所述特定副法向量计算块三角矩阵；

利用所述块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定法向量的方向计算每个测量点处的系数以及沿每个相应测量点处的特定副法向量的方向计算每个测量点处的另一系数；

利用每个相应测量点处的所述切向量的一阶导数、所述系数及所述另一系数计算每个测量点处的井眼曲率以及每个测量点处的法向量；

利用每个相应测量点处的所述井眼曲率、所述切向量和所述法向量计算所述测量点之间的每个间隔的切向量插值函数；以及

利用扭矩－阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定所述井眼轨迹。

22. 如权利要求 21 所述的方法，其中，

$$\tilde{n}_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j \cos \vartheta_j \\ \cos \varphi_j \sin \vartheta_j \\ -\sin \varphi_j \end{bmatrix} \text{ 用于计算每个测量点处的所述特定法向量。}$$

23. 如权利要求 21 所述的方法，其中，

$$\tilde{b}_j = \begin{bmatrix} -\sin \vartheta_j \\ \cos \vartheta_j \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 用于计算每个测量点处的所述特定副法向量。}$$

24. 如权利要求 21 所述的方法, 其中,

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{b}_{j+1} \right] \frac{d^2 f_{2j+1}}{ds^2} + \alpha_j \left(\frac{d^2 f_{2j}}{ds^2} + \frac{d^2 f_{4j+1}}{ds^2} \right) + \left[\alpha_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{b}_{j+1} \right] \frac{d^2 f_{4j}}{ds^2} \\ & = \tilde{n}_j \cdot \left(\frac{d^2 f_{3j}}{ds^2} - \frac{d^2 f_{1j+1}}{ds^2} \right) \end{aligned}$$

用于计算每个测量点处的所述系数。

25. 如权利要求 21 所述的方法, 其中,

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{b}_{j+1} \right] \frac{d^2 f_{2j+1}}{ds^2} + \beta_j \left(\frac{d^2 f_{2j}}{ds^2} + \frac{d^2 f_{4j+1}}{ds^2} \right) + \left[\alpha_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{b}_{j+1} \right] \frac{d^2 f_{4j}}{ds^2} \\ & = \tilde{b}_j \cdot \left(\frac{d^2 f_{3j}}{ds^2} - \frac{d^2 f_{1j+1}}{ds^2} \right) \end{aligned}$$

用于计算每个测量点处的所述另一系数。

26. 如权利要求 21 所述的方法, 其中,

$$\kappa_j n_j^{\sigma} = \alpha_j \tilde{n}_j + \beta_j \tilde{b}_j$$

用于计算每个测量点处的所述井眼曲率和法向量。

27. 如权利要求 21 所述的方法, 其中,

$$\frac{\sigma}{t_j}(s) = \frac{t_j(s)}{\sqrt{t_j(s) \cdot \sigma_j(s)}}$$

用于计算每个切向量插值函数。

28. 如权利要求 21 所述的方法, 其中, 所述测量数据包括每个测量点处的倾角、方位角和所测量的深度。

29. 如权利要求 21 所述的方法, 还包括:

利用所述井眼轨迹计算扭矩-阻力钻柱的解。

30. 如权利要求 29 所述的方法, 还包括:

利用所述扭矩-阻力钻柱的解改进所述井眼轨迹。

31. 一种具有用于井眼轨迹建模的计算机可执行指令的计算机可读介质, 所述指令可执行以实施:

利用每个相应测量点处的测量数据计算井眼内的每个测量点处的切向量, 所述井眼包括两个或更多个测量点;

计算每个相应测量点处的特定法向量和特定副法向量;

利用每个相应测量点处的所述切向量、所述特定法向量和所述特定副法向量计算块三角矩阵;

利用所述块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定法向量的方向计算每个测量点处的系数以及沿每个相应测量点处的特定副法向量的方向计算每个测量点处的另一系数;

利用每个相应测量点处的所述切向量的一阶导数、所述系数及所述另一系数计算每个

测量点处的井眼曲率以及每个测量点处的法向量；

利用每个相应测量点处的所述井眼曲率、所述切向量和所述法向量计算所述测量点之间的每个间隔的切向量插值函数；以及

利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定所述井眼轨迹。

32. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 其中,

$$\tilde{n}_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j \cos \vartheta_j \\ \cos \varphi_j \sin \vartheta_j \\ -\sin \varphi_j \end{bmatrix} \text{ 用于计算每个测量点处的所述特定法向量。}$$

33. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 其中,

$$\tilde{b}_j = \begin{bmatrix} -\sin \vartheta_j \\ \cos \vartheta_j \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 用于计算每个测量点处的所述特定副法向量。}$$

34. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 其中,

$$\begin{aligned} & [\alpha_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{b}_{j+1}] \frac{d^2 f_{2j+1}}{ds^2} + \alpha_j \left(\frac{d^2 f_{2j}}{ds^2} + \frac{d^2 f_{4j+1}}{ds^2} \right) + [\alpha_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{n}_j \cdot \tilde{b}_{j+1}] \frac{d^2 f_{4j}}{ds^2} \\ & = \tilde{n}_j \cdot \left(\tilde{b}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}}{ds^2} - \tilde{b}_{j-1} \frac{d^2 f_{1j-1}}{ds^2} \right) \end{aligned}$$

用于计算每个测量点处的所述系数。

35. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 其中,

$$\begin{aligned} & [\alpha_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{b}_{j+1}] \frac{d^2 f_{2j+1}}{ds^2} + \beta_j \left(\frac{d^2 f_{2j}}{ds^2} + \frac{d^2 f_{4j+1}}{ds^2} \right) + [\alpha_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{b}_{j+1}] \frac{d^2 f_{4j}}{ds^2} \\ & = \tilde{b}_j \cdot \left(\tilde{b}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}}{ds^2} - \tilde{b}_{j-1} \frac{d^2 f_{1j-1}}{ds^2} \right) \end{aligned}$$

用于计算每个测量点处的所述另一系数。

36. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 其中,

$$\kappa_j n_j^{\sigma} = \alpha_j \tilde{n}_j + \beta_j \tilde{b}_j$$

用于计算每个测量点处的所述井眼曲率和所述法向量。

37. 如权利要求 31 所述的方法, 其中,

$$\tilde{t}_j(s) = \frac{\tilde{T}_j(s)}{\sqrt{\tilde{T}_j(s) \cdot \tilde{T}_j(s)}} \text{ 用于计算每个切向量插值函数。}$$

38. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 其中, 所述测量数据包括每个测量点处的倾角、方位角和所测量的深度。

39. 如权利要求 31 所述的计算机可读介质, 还包括:

利用所述井眼轨迹计算扭矩-阻力钻柱的解。

40. 如权利要求 39 所述的计算机可读介质, 还包括:

利用所述扭矩-阻力钻柱的解改进所述井眼轨迹。

用于井眼轨迹建模的系统和方法

[0001] 对相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于 2007 年 12 月 17 日提交的、申请号为 61/014,362 的美国临时专利申请的优先权。

[0003] 关于联邦资助研究的声明

[0004] 不适用。

技术领域

[0005] 本发明一般地涉及井眼轨迹建模。更具体地,本发明涉及应用从钻柱的解所推导的样条函数来对井眼轨迹建模。

背景技术

[0006] 井眼模型用于两种不同的用途。第一用途是设计井的位置,包括确定到达特定目标所需要的起斜点、构造和下降率以及直段。第二用途是对所测量的倾角和方位角积分以确定井的位置。

[0007] 已经提出过各种具有变化的平滑度的轨迹模型。最简单的模型 - 切线模型包括直线段。这样,该模型的斜率在测量点是不连续的。最常用的模型是由圆弧段组成的最小曲率模型。该模型具有连续的斜率,但其曲率不连续。事实上,最小曲率模型认为井眼不必具有连续的曲率。

[0008] 典型地,钻柱载荷分析利用钻柱计算机模型完成。到目前为止,最常用的钻柱分析方法是“扭矩 - 阻力”模型,是由 Johncsik, C. A., Dawson, R. 和 Friesen, D. B. 最先在 Society of Petroleum Engineers 上的文章“Torque and Drag in Directional Wells-Prediction and Measurement”中进行了描述,后来转换成微分方程式形式,如同 Sheppard, M. C., Wick, C 和 Burgess, T. M. 在文章“Designing Well Pathsto Reduce Drag and Torque”中所描述的那样。

[0009] 扭矩 - 阻力模型参照与钻柱操作相关的扭矩和阻力。与旋转钻柱重量相比,阻力是过大的载荷,当拉钻柱时可能是正的,或者当滑到井中时是负的。该阻力可归因于钻柱与井眼接触所产生的摩擦力。当旋转时,这个摩擦力就会减小传递给钻头的表面扭矩。当进行井设计或此后的分析时,能够估计摩擦力是有益的。由于扭矩 - 阻力模型简单并且一般可用,所以广泛地用于设计和实地中。实地经验指出这个模型对许多井通常给出了很好的结果,但有时却表现很差。

[0010] 在标准扭矩 - 阻力模型中,将钻柱轨迹假设为与井眼轨迹相同,考虑到测量是在钻柱内进行的,这个假设是合理的。假设与井眼的接触是连续的。然而,假如确定井眼轨迹的最常用的方法是最小曲率方法,则因为弯矩在测量点是不连续的并且不平滑的,井眼形状小于理想的情况。这个问题通过忽略弯矩得到解决,但是作为这个假设的结果,一些接触力也被忽略了。

[0011] 因此,需要一个具有充分平滑度的新的井眼轨迹模型来模拟钻柱轨迹。

[0012] 还需要提供一个新的井眼轨迹模型,将简单的扭矩-阻力钻柱模型转换成全刚杆(full stiff-string)公式,因为在该公式中,钻柱弯曲和剪切力使得不能利用常规的井眼轨迹模型正确地确定。

发明内容

[0013] 通过提供用于井眼轨迹建模的系统和方法,本发明满足上述需求并且克服了现有技术的一个或多个缺陷,可用于模拟相应的钻柱轨迹及将扭矩-阻力钻柱模型转换成全刚杆公式。

[0014] 在一个实施方式中,本发明包括用于井眼轨迹建模的计算机实施方法,所述方法包括:i)利用每个相应测量点处的井眼曲率、切向量和法向量计算井眼内的两个或更多个测量点之间的每个间隔的切向量插值函数;以及(ii)利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定井眼轨迹。

[0015] 在另一实施方式中,本发明包括一种具有用于对井眼轨迹建模的计算机可执行指令的计算机可读介质。所述指令可执行以实施:i)利用每个相应测量点处的井眼曲率、切向量和法向量计算井眼内的两个或更多个测量点之间的每个间隔的切向量插值函数;以及(ii)利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定井眼轨迹。

[0016] 在又一实施方式中,本发明包括一种用于井眼轨迹建模的计算机实施方法,所述方法包括:i)利用每个相应测量点处的测量数据计算井眼内的每个测量点的切向量,所述井眼包括两个或更多个测量点;ii)计算每个测量点的特点法向量和特定副法向量;iii)利用每个相应测量点处的所述切向量、特定法向量和特定副法向量计算块三角矩阵;iv)利用所述块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定法向量的方向计算每个测量点的系数以及沿每个相应测量点处的特定副法向量的方向计算每个测量点的另一系数;v)利用每个相应测量点的所述切向量的一阶导数、所述系数及另一系数计算每个测量点的井眼曲率以及每个测量点的所述法向量;vi)利用每个相应测量点的所述井眼曲率、切向量和法向量计算所述测量点之间的每个间隔的切向量插值函数;以及vii)利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定井眼轨迹。

[0017] 在又一实施方式中,本发明包括一种具有用于井眼轨迹建模的计算机可执行指令的计算机可读介质。所述指令可执行以实施:i)利用每个相应测量点处的测量数据计算井眼内的每个测量点的切向量,所述井眼包括两个或更多个测量点;ii)计算每个测量点的特点法向量和特定副法向量;iii)利用每个相应测量点处的所述切向量、特定法向量和特定副法向量计算块三角矩阵;iv)利用所述块三角矩阵沿每个相应测量点处的特定法向量方向计算每个测量点的所述系数以及沿每个相应测量点处的特定副法向量方向计算每个测量点的所述另一系数;v)利用每个相应测量点的所述切向量的一阶导数、所述系数及另一系数计算每个测量点的井眼曲率以及每个测量点的所述法向量;vi)利用每个相应测量点的所述井眼曲率、切向量和法向量计算所述测量点之间的每个间隔的切向量插值函数;以及vii)利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定井眼轨迹。

[0018] 根据下述各种实施方式的描述和相关附图,对本领域技术人员而言,本发明的其他方面、优点和实施方式将会变得明显。

附图说明

[0019] 以下结合附图描述本发明,其中,相同元件用同一附图标记表示,以及其中:

[0020] 图 1 是例示用于实施本发明的系统的一个实施方式的框图。

[0021] 图 2 是例示比较用于圆弧井眼轨迹的解析模型,最小曲率模型和本发明的样条模型的曲线图。

[0022] 图 3 是例示比较用于悬链线井眼轨迹的解析模型、最小曲率模型和本发明的样条模型的曲线图。

[0023] 图 4 是例示比较用于螺旋线井眼轨迹的解析模型、最小曲率模型和本发明的样条模型的曲线图。

[0024] 图 5 是例示比较用于悬链线井眼轨迹的解析模型与本发明的样条模型之间的曲率变化率的曲线图。

[0025] 图 6 是例示比较用于螺旋线井眼轨迹的解析模型与本发明的样条模型之间的扭曲度的曲线图。

[0026] 图 7 是例示用于实例 1 的井眼的测试用例。

[0027] 图 8 是比较对于实例 1 中所用的井眼的测试用例的最小曲率模型与本发明的样条模型之间的弯矩的曲线图解。

[0028] 图 9A 是实例 2 中所用的短半径井路径的曲线图解(俯视图)。

[0029] 图 9B 是实例 2 中所用的短半径井路径的曲线图解(北向/东向视图)。

[0030] 图 10 是比较对于实例 2 中所用的井路径,恒定曲率模型和本发明的样条模型之间的短半径接触力的曲线图解。

[0031] 图 11 是比较对于实例 2 中所用的井路径,恒定曲率模型和本发明的样条模型之间的短半径弯矩的曲线图解。

[0032] 图 12 是例示用于实施本发明的方法的一个实施方式的流程图。

具体实施方式

[0033] 将对本发明的主题进行具体描述,但是,描述本身不意图限制本发明的范围。这样,主题还可能利用其他方法实施,包括类似于这里描述的、与其他现有或未来技术结合的不同步骤或步骤的组合。而且,虽然术语“步骤”可在这里用来描述所用方法的不同组成部分,该术语不应解释为暗示这里所揭示的各种步骤之间的任何特殊顺序,除非本说明书明确地将其限定为特殊的顺序。

[0034] 系统描述

[0035] 本发明可通过指令的计算机可执行程序(例如程序模块,通常称为计算机执行的应用软件或应用程序)实现。所述软件可包括例如例行程序、程序、对象、组件和执行特殊任务或实施特殊的抽象数据类型的数据结构。软件形成了一个接口,可允许计算机根据输入源来反应。WELLPLAN™ 是兰德马克绘图国际公司(Landmark Graphics Corporation)出售的商业应用软件,可作为用于实施本发明的接口应用。该软件还可与其他代码段协作发起各种任务以结合接收数据源响应所接收到的数据。该软件可存储和/或承载于诸如 CD-ROM、磁盘、磁泡存储器和半导体存储器(例如,各种类型的 RAM 或 ROM)任何类型的存储介质上。此外,该软件及其结果可通过诸如光纤、金属线、自由空间的各种载体介质和/或

通过诸如因特网的各种网络传输。

[0036] 而且,本领域技术人员应当理解,本发明可利用各种计算机系统架构操作,所述计算机系统架构包括手持设备、多处理器系统、基于微处理器的或可编程的消费电子产品、小型计算机、大型计算机等。本发明适用于许多计算机系统和计算机网络。本发明可用于通过以通信网络连接的远程处理设备执行任务的分布式计算环境中。在分布式计算环境中,程序模块可位于包括记忆存储设备的本地和远程计算机存储介质中。因此,本发明可结合各种硬件、软件或其组合在计算机系统或其他处理系统中实施。

[0037] 现在参考图 1,例示了用于在计算机上实施本发明的系统的框图。该系统包括具有存储器的计算单元(有时称为计算系统)、应用程序、用户接口和处理单元。计算单元仅仅是一个适当的计算环境的实例,并不意图对本发明的应用范围和功能进行任何限制。

[0038] 该存储器主要存储由计算单元执行的、包括计算机可执行指令的应用程序(还可描述为程序模块),用于实施这里所描述的和图 2-12 所例示的方法。因此,存储器包括井眼轨迹模块,该模块使参考图 2-12 所例示和描述的方法以及 WELLPLAN_{TM} 能够使用。

[0039] 虽然所示计算单元具有通用存储器,典型地,计算单元包括各种计算机可读介质。作为实例而非限制,计算机可读介质可包括计算机存储介质和通信介质。计算系统存储器可包括易失性和/或非易失性存储器形式的计算机存储介质,例如只读存储器(ROM)和随机存取存储器(RAM)。基本输入/输出系统(BIOS)通常存储在 ROM 中,其包括例如在启动期间帮助在计算单元内的元件之间传递信息的基本例程序。RAM 通常包括可立即进入处理单元和/或目前正在由处理单元操作的数据和/或程序模块。作为实例而非限制,计算单元包括操作系统、应用程序、其他程序模块和程序数据。

[0040] 所示存储器内的组件还可包括于其他可移动/不可移动、易失性/非易失性计算机存储介质中。仅作为示例,硬盘驱动器可读取或写入不可移动的、非易失性磁介质,磁盘驱动器可读取或写入可移动的、非易失性磁盘,以及光盘驱动器可读取或写入可移动的、非易失性光盘,例如 CD ROM 或其他光学介质。其他可移动的/不可移动的、易失性/非易失性计算机存储介质可用于示范性的操作环境中,可包括但不限于盒式磁带、闪存卡、数字多功能光碟、数字视频磁带、固态 RAM、固态 ROM 等。因此,上述驱动器和它们的附属计算机存储介质存储和/或承载用于计算单元的计算机可读指令、数据结构、程序模块和其他数据。

[0041] 用户可通过用户接口将命令和信息输入到计算单元,所述用户接口可以是诸如键盘和点设备(一般指鼠标、轨迹球或触摸板)。输入设备可包括麦克风、操纵杆、卫星天线、扫描仪等。

[0042] 这些和其他输入设备常常通过耦合于系统总线的用户接口连接于处理单元,但可通过诸如平行端口或通用串行总线(USB)的其他接口和总线结构进行连接。监视器或其他类型的显示设备可通过诸如 video 接口的接口连接于系统总线。除监视器外,计算机还可以包括通过输出外围接口连接的其他外围输出设备,例如喇叭和打印机。

[0043] 虽然计算单元的许多其他内部组件没有示出,本领域技术人员将会理解这些组件及其相互连接是公知的。

[0044] 方法描述

[0045] 与现有井眼轨迹模型不同,本发明从下述概念出发,即在钻柱内进行测量所得到的轨迹是钻柱的轨迹,该轨迹必须具有与曲率成比例的弯矩的连续性。这里所用的术

语在 Mitchell, Robert F. 在 Society of Petroleum Engineers 上的文章 “Drillstring Solutions Improve the Torque-Drag Model” (“SPE 112623”) 中进行了描述, 此处通过引用的方式将其并入于此, 并重述于下表 1 中。

$\mathbf{b}$	副法向量
$\tilde{\mathbf{b}}$	特定副法向量
E	杨氏弹性模量 (psf)
F	有效轴向力 (lbf.)
$\tilde{F}$	$F - Ek^2$
I	转动惯量 (ft^4)
$\mathbf{i}_E$	向东的单位向量
$\mathbf{i}_N$	向北的单位向量
$\mathbf{i}_Z$	向下的单位向量
$\mathbf{h}$	法向量
$\tilde{\mathbf{n}}$	特定法向量
s	测量的深度 (ft)
$\mathbf{t}$	切向量
T	样条切向量函数
$\mathbf{u}$	位置向量, (ft)
$\mathbf{u}_j$	初始位置向量, 增量 j (ft)
α_j	沿 $\tilde{\mathbf{n}}$ 方向的系数 (ft^{-1})
β_j	沿 $\tilde{\mathbf{b}}$ 方向的系数 (ft^{-1})
Δs_j	$s_{j+1} - s_j$ (ft)
λ_j	样条函数的系数
ϵ_j	$\mathbf{h}$ 和 $\tilde{\mathbf{n}}$ 之间的角
κ	井眼 曲率 (ft^{-1})
ϕ	井眼 轨迹倾角
θ	井眼 轨迹方位角
ξ_j	$(s - s_j)/(s_{j+1} - s_j)$
$'$	d/ds
iv	d^4/ds^4
下标	
j	测量点

[0046]

[0047] 表 1

[0048] 为了在轨迹模型中获得更好的连续性,现有技术中已经公知使用三次样条。例如,如果使用表 $\{x_i, y_i\}$, 作为 x 的函数的 y 的中间值可以通过线性插值确定:

$$[0049] \quad y(x) = y_j \left(\frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \right) + y_{j+1} \left(\frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j} \right) \quad (1)$$

[0050] 其中,在 x_j 和 x_{j+1} 之间进行插值。如果希望插值在点 x_j 处具有平滑的一阶和二阶导数,可进行如下插值:

$$[0051] \quad y(x) = y_j f_1(x) + y_j'' f_2(x) + y_{j+1} f_3(x) + y_{j+1}'' f_4(x) \quad (2)$$

[0052] 其中,函数 f_j 构造后使得:

$$[0053] \quad \begin{aligned} y(x_j) &= y_j \\ y(x_{j+1}) &= y_{j+1} \\ y''(x_j) &= y_j'' \\ y''(x_{j+1}) &= y_{j+1}'' \end{aligned} \quad (3)$$

[0054] 在经典三次样条公式中, f_j 是 x 的三次函数,未知系数 y_j'' 通过要求 $y(x)$ 的一阶导数在每个 x_j 处的连续性来确定。这里,方程式 (2) 中的函数不必是三次函数。它们必须仅满足方程式 (3)。应用诸如三次样条和正切样条的样条公式对井眼轨迹建模在现有技术中是公知的。但是不能根据测量数据确定井眼轨迹。而且,适用于三维曲线的常规样条不满足方程式 (5) 和方程式 (6)。

[0055] 一旦获得测量数据,可以计算每个测量点 j 的切向量 t_j^w 。用于对切向量进行插值的一个公式是:

[0056]

$$t_j^w(s) = \frac{t_j^w(s)}{\sqrt{T_j(s) \bullet T_j(s)}}$$

[0057]

$$T_j(s) = t_j^w f_{1j}(s) + \kappa_j n_j^w f_{2j}(s) \quad (4)$$

[0058]

$$+ t_{j+1}^w f_{3j}(s) + \kappa_{j+1} n_{j+1}^w f_{4j}(s)$$

[0059] 其中, s 是测量的深度, κ_j 是 s_j 处的曲率, n_j^w 是 s_j 处的法向量。该公式具有两个目的。第一目的是满足用于曲线的 Frenet 方程式 (选择的合适的函数 f_{ij}):

[0060]

$$\frac{dt^w(s)}{ds} = \kappa(s) n^w(s) \quad (5)$$

[0061] 第二原因是保证 s 确实是测量的深度。该要求意味着:

$$[0062] \quad du_1^2 + du_2^2 + du_3^2 = ds^2$$

[0063] (位置增量等于增量弧长), 或依据切向量:

[0064]

$$\left(\frac{du_1}{ds} \right)^2 + \left(\frac{du_2}{ds} \right)^2 + \left(\frac{du_3}{ds} \right)^2 = \frac{du^w}{ds} \bullet \frac{du^w}{ds} = t^w \bullet t^w = 1 \quad (6)$$

[0065] 如下节所证明的,方程式 (4) 满足这个条件。确定方程式 (4) 中的未知量 (即法向向量和曲率) 的细节也在下节中描述。

[0066] 井眼轨迹的样条函数

[0067] 用于确定井路径的正常方法是使用一些类型的测量工具测量各深度处的斜率和方位角,然后计算该轨迹。在每个测量点 j , 测量倾角 φ_j 和方位角 $\mathcal{G}_j$, 以及测量点之间的轨迹长度 $\Delta s_j = s_{j+1} - s_j$ 。因此, 每个测量点 j 包括具有倾角 φ_j 、方位角 $\mathcal{G}_j$ 和测量深度值 s 的测量数据。这些角已被纠正为 (i) 磁测的正北或者 (ii) 如果是陀螺测量, 则用于漂移。测量角限定每个测量点 j 处的轨迹的切线 $\vec{t}_j^y$, 其中切向量依据倾角 φ_j 和方位角 $\mathcal{G}_j$ 根据下述公式限定:

[0068]

$$\vec{t}_j^y \cdot \vec{i}_N^y = \cos(\mathcal{G}_j) \sin(\varphi_j)$$

[0069]

$$\vec{t}_j^y \cdot \vec{i}_E^y = \sin(\mathcal{G}_j) \sin(\varphi_j) \quad (7)$$

[0070]

$$\vec{t}_j^y \cdot \vec{i}_z^y = \cos(\varphi_j)$$

[0071] 如果已知角 φ 和 $\mathcal{G}$ 在测量点之间如何变化, 或者等价地, 如果已知切向量在测量点之间如何变化, 则可通过累加切向量确定该轨迹:

$$[0072] \quad \vec{t}_j^y = \frac{d\vec{u}_j^y}{ds}, \text{ 因此}$$

[0073]

$$(8)$$

$$[0074] \quad \vec{u}_j^y(s) = \vec{u}_j^y + \int_j^s \vec{t}_j^y ds$$

[0075] 给出切向量 $\vec{t}_j^y$ 和 $\vec{t}_{j+1}^y$ 以及关联的法向量 $\vec{n}_j^y$ 和 $\vec{n}_{j+1}^y$, 即能创建与这些向量有关的切向量插值函数。第一, 需要一组具有下述特性的插值函数 $f_{ij}(s)$, $s \in [s_j, s_{j+1}]$:

$$[0076] \quad f_{1j}(s_j) = 1, \quad \frac{df_{1j}(s_j)}{ds} = 0, \quad f_{1j}(s_{j+1}) = 0, \quad \frac{df_{1j}(s_{j+1})}{ds} = 0$$

$$[0077] \quad f_{2j}(s_j) = 0, \quad \frac{df_{2j}(s_j)}{ds} = 1, \quad f_{2j}(s_{j+1}) = 0, \quad \frac{df_{2j}(s_{j+1})}{ds} = 0 \quad (9)$$

$$[0078] \quad f_{3j}(s_j) = 0, \quad \frac{df_{3j}(s_j)}{ds} = 0, \quad f_{3j}(s_{j+1}) = 1, \quad \frac{df_{3j}(s_{j+1})}{ds} = 0$$

$$[0079] \quad f_{4j}(s_j) = 0, \quad \frac{df_{4j}(s_j)}{ds} = 0, \quad f_{4j}(s_{j+1}) = 0, \quad \frac{df_{4j}(s_{j+1})}{ds} = 1$$

[0080] 存在满足方程式 (9) 的多种函数。如果样条函数 $T_j(\xi)$ 限定成:

[0081]

$$T_j(\xi) = \vec{t}_j^y f_{1j}(s) + \kappa_j \vec{n}_j^y f_{2j}(s) + \vec{t}_{j+1}^y f_{3j}(s) + \kappa_{j+1} \vec{n}_{j+1}^y f_{4j}(s) \quad (10)$$

[0082] 则变得清楚:

[0083]

$$\vec{T}_j^y(s_j) = \vec{t}_j^y$$

[0084]

$$\vec{T}_j^y(s_{j+1}) = \vec{t}_{j+1}^y$$

[0085]

$$\frac{dT_j}{ds}(s_j) = \kappa_j \bar{n}_j \quad (11)$$

[0086]

$$\frac{dT_j}{ds}(s_{j+1}) = \kappa_{j+1} \bar{n}_{j+1}$$

[0087] 对于在 $s = s_j$ 和 $s = s_{j+1}$ 时的切向量, 函数 T_j 满足 Frenet 方程式:

[0088]

$$\frac{dT_j(s)}{ds} = \kappa(s) \bar{n}(s) \quad (12)$$

[0089] 然而, 因为 T_j 不是一个单位向量, 所以 T_j 不是切向量。这可通过对因为 T_j 进行正则化来纠正:

[0090]

$$\bar{t}_j(s) = \frac{T_j(s)}{\sqrt{T_j(s) \cdot T_j(s)}} \quad (13)$$

[0091] 所示仍然满足方程式 (12)。为了计算曲率 κ_j , 对方程式 (13) 进行两次求导, 并在 $s = s_j$ 和 $s = s_{j+1}$ 处进行计算:

[0092]

$$\frac{d^2 \bar{t}(s_j)}{ds^2} \cdot \bar{t}_j = -\kappa_j^2$$

[0093]

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{t}(s_j)}{ds^2} \cdot \bar{n}_j &= \kappa_j \frac{d^2 f_{2j}(s_j)}{ds^2} + \bar{n}_j \cdot \bar{t}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}(s_j)}{ds^2} + \kappa_{j+1} \bar{n}_{j+1} \cdot \bar{n}_j \frac{d^2 f_{4j}(s_j)}{ds^2} \\ \frac{d^2 \bar{t}(s_j)}{ds^2} \cdot \bar{b}_j &= \bar{t}_{j+1} \cdot \bar{b}_j \frac{d^2 f_{3j}(s_j)}{ds^2} + \kappa_{j+1} \bar{n}_{j+1} \cdot \bar{b}_j \frac{d^2 f_{4j}(s_j)}{ds^2} \end{aligned} \quad (14)$$

[0095]

$$\frac{d^2 \bar{t}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \bar{t}_{j+1} = -\kappa_{j+1}^2$$

[0096]

$$\frac{d^2 \bar{t}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \bar{n}_{j+1} = \kappa_{j+1} \frac{d^2 f_{4j}(s_{j+1})}{ds^2} + \bar{n}_{j+1} \cdot \bar{t}_j \frac{d^2 f_{1j}(s_{j+1})}{ds^2} + \kappa_j \bar{n}_j \cdot \bar{n}_{j+1} \frac{d^2 f_{2j}(s_{j+1})}{ds^2}$$

[0097]

$$\frac{d^2 \bar{t}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \bar{b}_{j+1} = \bar{t}_j \cdot \bar{b}_{j+1} \frac{d^2 f_{1j}(s_{j+1})}{ds^2} + \kappa_j \bar{n}_j \cdot \bar{b}_{j+1} \frac{d^2 f_{2j}(s_{j+1})}{ds^2}$$

[0098] 应用 Frenet 方程式 (12) 和

$$\frac{d\bar{n}(s)}{ds} = -\kappa(s) \bar{t}(s) + \tau(s) \bar{b}(s) \quad (15)$$

[0100]

$$\frac{d^2 \bar{t}(s)}{ds^2} = -\kappa^2(s) \bar{t}(s) + \kappa'(s) \bar{n}(s) + \kappa(s) \tau(s) \bar{b}(s)$$

[0101] 显然,

[0102]

$$\frac{d^2 \vec{t}(s_j)}{ds^2} \cdot \vec{t}_j = -\kappa_j^2 \quad (16a)$$

[0103]

$$\frac{d^2 \vec{t}(s_j)}{ds^2} \cdot \vec{n}_j = \frac{d\kappa_j}{ds} \quad (16b)$$

[0104]

$$\frac{d^2 \vec{t}(s_j)}{ds^2} \cdot \vec{b}_j = \kappa_j \tau_j \quad (16c)$$

[0105]

$$\frac{d^2 \vec{t}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \vec{t}_{j+1} = -\kappa_{j+1}^2 \quad (16d)$$

[0106]

$$\frac{d^2 \vec{t}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \vec{n}_{j+1} = \frac{d\kappa_{j+1}}{ds} \quad (16e)$$

[0107]

$$\frac{d^2 \vec{t}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \vec{b}_{j+1} = \kappa_{j+1} \tau_{j+1} \quad (16f)$$

[0108] 方程式 (16a) 和方程式 (16b) 同样地满足 Frenet 公式, 方程式 (15)。在用这组方程式求解曲率 κ_j 之前, 需要对法向量($\vec{n}_j^w$)和副法向量($\vec{b}_j^w$)进行表示。切向量根据下述方法由倾角(φ_j)和方位角(ϑ_j)来限定:

[0109]

$$\vec{t}_j = \begin{bmatrix} \sin \varphi_j \cos \vartheta_j \\ \sin \varphi_j \sin \vartheta_j \\ \cos \varphi_j \end{bmatrix} \quad (17)$$

[0110] 则 Frenet 方程式 (7) 要求:

[0111]

$$\frac{d}{ds} \vec{t}_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j \cos \vartheta_j \\ \cos \varphi_j \sin \vartheta_j \\ -\sin \varphi_j \end{bmatrix} \frac{d}{ds} \varphi_j + \begin{bmatrix} -\sin \vartheta_j \\ \cos \vartheta_j \\ 0 \end{bmatrix} \sin \varphi_j \frac{d}{ds} \vartheta_j \quad (18)$$

[0112]

$$= \kappa_j \vec{n}_j$$

[0113] 根据方程式 (12), 曲率 κ_j 的方程式变成:

[0114]

$$\kappa_j = \sqrt{\left(\frac{d}{ds} \varphi_j \right)^2 + \sin^2 \varphi_j \left(\frac{d}{ds} \vartheta_j \right)^2} \quad (19)$$

[0115] 我们对方程式 (18) 中建立的下述量进行限定:

$$\vec{n}_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j \cos \vartheta_j \\ \cos \varphi_j \sin \vartheta_j \\ -\sin \varphi_j \end{bmatrix} \quad (20)$$

[0117]

$$\tilde{\mathbf{b}}_j = \begin{bmatrix} -\sin \vartheta_j \\ \cos \vartheta_j \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0118] 这些向量对限定法向量和副法向量是有用的。

[0119] 如上所述, $\mathbf{t}_j^\varpi$ 、 $\tilde{\mathbf{n}}_j$ 和 $\tilde{\mathbf{b}}_j$ 在 s_j 形成右手坐标系统, 法向量($\mathbf{n}_j^\varpi$)和副法向量($\mathbf{b}_j^\varpi$)可通过角 ε_j 绕切向量旋转来限定:

$$[0120] \quad \tilde{\mathbf{n}}_j^\varpi = \tilde{\mathbf{n}}_j \cos \varepsilon_j + \tilde{\mathbf{b}}_j \sin \varepsilon_j \quad (21)$$

[0121]

$$\tilde{\mathbf{b}}_j^\varpi = -\tilde{\mathbf{n}}_j \sin \varepsilon_j + \tilde{\mathbf{b}}_j \cos \varepsilon_j$$

[0122] 则 $\mathbf{n}_j^\varpi$ 是与 Frenet 方程式 (5) 一致的单位向量, 假设:

[0123]

$$\cos \varepsilon_j = \frac{1}{\kappa_j} \frac{d}{ds} \varphi_j \quad \text{因此} \quad \sin \varepsilon_j = \frac{\sin \varphi_j}{\kappa_j} \frac{d}{ds} \vartheta_j \quad (22)$$

[0124] 由于正弦和余弦函数引入了非线性, 变量 κ_j 和 ε_j 不是最适宜的选择。一种替代选择可以是:

[0125]

$$\kappa_j \tilde{\mathbf{n}}_j^\varpi = \alpha_j \tilde{\mathbf{n}}_j + \beta_j \tilde{\mathbf{b}}_j$$

$$[0126] \quad \alpha_j = \kappa_j \cos \varepsilon_j$$

$$[0127] \quad \beta_j = \kappa_j \sin \varepsilon_j \quad (23)$$

$$[0128] \quad \kappa_j = \sqrt{\alpha_j^2 + \beta_j^2}$$

$$[0129] \quad \varepsilon_j = \tan^{-1} \frac{\beta_j}{\alpha_j}$$

[0130] 方程式 (16a)-(16f) 可以根据向量 $\tilde{\mathbf{n}}$ 和 $\tilde{\mathbf{b}}$ 改写成:

[0131]

$$[0132] \quad \begin{aligned} \frac{d^2 \tilde{\mathbf{t}}(s_j)}{ds^2} \cdot \tilde{\mathbf{n}}_j &= \alpha_j \frac{d^2 f_{2j}(s_j)}{ds^2} + \tilde{\mathbf{n}}_j \cdot \tilde{\mathbf{t}}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}(s_j)}{ds^2} + \tilde{\mathbf{n}}_j \cdot [\alpha_{j+1} \tilde{\mathbf{n}}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{\mathbf{b}}_{j+1}] \frac{d^2 f_{4j}(s_j)}{ds^2} \\ \frac{d^2 \tilde{\mathbf{t}}(s_j)}{ds^2} \cdot \tilde{\mathbf{b}}_j &= \beta_j \frac{d^2 f_{2j}(s_j)}{ds^2} + \tilde{\mathbf{b}}_j \cdot \tilde{\mathbf{t}}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}(s_j)}{ds^2} + \tilde{\mathbf{b}}_j \cdot [\alpha_{j+1} \tilde{\mathbf{n}}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{\mathbf{b}}_{j+1}] \frac{d^2 f_{4j}(s_j)}{ds^2} \end{aligned} \quad (24)$$

[0133]

$$[0134] \quad \frac{d^2 \tilde{\mathbf{t}}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \tilde{\mathbf{n}}_{j+1} = \alpha_{j+1} \frac{d^2 f_{4j}(s_{j+1})}{ds^2} + \tilde{\mathbf{n}}_{j+1} \cdot \tilde{\mathbf{t}}_j \frac{d^2 f_{1j}(s_{j+1})}{ds^2} + \tilde{\mathbf{n}}_{j+1} \cdot (\alpha_j \tilde{\mathbf{n}}_j + \beta_j \tilde{\mathbf{b}}_j) \frac{d^2 f_{2j}(s_{j+1})}{ds^2}$$

[0135]

$$[0136] \quad \frac{d^2 \tilde{\mathbf{t}}(s_{j+1})}{ds^2} \cdot \tilde{\mathbf{b}}_{j+1} = \beta_{j+1} \frac{d^2 f_{4j}(s_{j+1})}{ds^2} + \tilde{\mathbf{b}}_{j+1} \cdot \tilde{\mathbf{t}}_j \frac{d^2 f_{1j}(s_{j+1})}{ds^2} + \tilde{\mathbf{b}}_{j+1} \cdot (\alpha_j \tilde{\mathbf{n}}_j + \beta_j \tilde{\mathbf{b}}_j) \frac{d^2 f_{2j}(s_{j+1})}{ds^2}$$

[0135] 对于 $j = 2, N-1$, $d^2 \tilde{\mathbf{t}}/ds^2$ 在测量点的连续性要求:

[0136]

$$[\alpha_{j-1} \tilde{\mathbf{n}}_j \cdot \tilde{\mathbf{n}}_{j-1} + \beta_{j-1} \tilde{\mathbf{n}}_j \cdot \tilde{\mathbf{b}}_{j-1}] \frac{d^2 f_{2j-1}}{ds^2} + \alpha_j \left(\frac{d^2 f_{2j}}{ds^2} + \frac{d^2 f_{4j-1}}{ds^2} \right) + [\alpha_{j+1} \tilde{\mathbf{n}}_j \cdot \tilde{\mathbf{n}}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{\mathbf{n}}_j \cdot \tilde{\mathbf{b}}_{j+1}] \frac{d^2 f_{4j}}{ds^2}$$

$$[0137] \quad = \tilde{n}_j \cdot \left(\tilde{t}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}}{ds^2} - \tilde{t}_{j-1} \frac{d^2 f_{1j-1}}{ds^2} \right) \quad (25)$$

[0138]

$$\left[\alpha_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{b}_{j+1} \right] \frac{d^2 f_{2j+1}}{ds^2} + \beta_j \left(\frac{d^2 f_{2j}}{ds^2} + \frac{d^2 f_{4j-1}}{ds^2} \right) + \left[\alpha_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{n}_{j+1} + \beta_{j+1} \tilde{b}_j \cdot \tilde{b}_{j+1} \right] \frac{d^2 f_{4j}}{ds^2}$$

[0139]

$$= \tilde{b}_j \cdot \left(\tilde{t}_{j+1} \frac{d^2 f_{3j}}{ds^2} - \tilde{t}_{j-1} \frac{d^2 f_{1j-1}}{ds^2} \right)$$

[0140] 该组方程式 (25) 与在初始点和终点限定的边界条件一起形成相对较易求解的对角占优块三角方程组。明显地, 还通过求解 α_j 和 β_j , 该系统还通过方程式 (23) 求解 $d\varphi_j/ds$ 和 $d\vartheta_j/ds$ 。进一步, 在对这些导数的限定中, $\vartheta_j (\pm n\pi)$ 的模不存在不定性。

[0141] 因此, 需要扭矩 - 阻力平衡方程式中出现的参数 κ 、 τ 和 κ' 的表达式。

[0142] 调回 Frenet 公式 (方程式 (12) 和 (15)):

[0143]

$$\frac{d\tilde{t}(s)}{ds} = \kappa(s)\tilde{\rho}(s)$$

$$[0144] \quad \frac{d\tilde{n}(s)}{ds} = -\kappa(s)\tilde{t}(s) + \tau(s)\tilde{b}(s) \quad (26)$$

[0145]

$$\frac{d^2 \tilde{t}(s)}{ds^2} = -\kappa^2(s)\tilde{t}(s) + \kappa'(s)\tilde{n}(s) + \kappa(s)\tau(s)\tilde{b}(s)$$

[0146]

$$\tilde{t}(s) \times \frac{d\tilde{t}(s)}{ds} = \tilde{t}(s) \times \kappa(s)\tilde{\rho}(s) = \kappa(s)\tilde{b}(s)$$

[0147] 可确定:

[0148]

$$\kappa(s) = \sqrt{\frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s) \cdot \frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s)}$$

[0149]

$$\kappa(s) \frac{d}{ds} \kappa(s) = \frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s) \cdot \frac{d^2}{ds^2} \tilde{t}_j(s) \quad (27)$$

[0150]

$$\kappa(s)^2 \tau(s) = \frac{d^2}{ds^2} \tilde{t}_j(s) \cdot \left[\tilde{t}_j(s) \times \frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s) \right]$$

[0151] 如果 κ 在给定点不等于零, 则:

[0152]

$$\kappa(s) = \sqrt{\frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s) \cdot \frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s)}$$

[0153]

$$\frac{d}{ds} \kappa(s) = \frac{\frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s) \cdot \frac{d^2}{ds^2} \tilde{t}_j(s)}{\sqrt{\frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s) \cdot \frac{d}{ds} \tilde{t}_j(s)}} \quad (28)$$

[0154]

$$\tau(s) = \frac{\frac{d^2}{ds^2} \varpi_j(s) \cdot \left[\varpi_j(s) \times \frac{d}{ds} \varpi_j(s) \right]}{\frac{d}{ds} \varpi_j(s) \cdot \frac{d}{ds} \varpi_j(s)}$$

[0155] 由于该系统是为了模拟钻柱, 插值函数 (f_{ij}) 的最佳选择是实际钻柱问题的解。

[0156] 具有大位移的无质量弹簧杆的机械平衡方程式是:

[0157]

$$EI u^{(4)} - [(F - EI \kappa^2) u']' = 0 \quad (29)$$

[0158] 其中, EI 是弯曲刚度, F 是轴向力 (正拉力), 及 κ 是杆的曲率。在对 s 的小间隔进行观察时, F 和 κ 几乎是恒量, 因此, 方程式 (7) 的解变成:[0159] 当 $EI \lambda^2 = F - EI \kappa^2 > 0$

$$u(s) = c_0 + c_1 s + c_2 \sinh(\lambda s) + c_3 \cosh(\lambda s) \quad (30a)$$

[0161] 当 $EI \lambda^2 = EI \kappa^2 - F > 0$

$$u(s) = c_0 + c_1 s + c_2 \sin(\lambda s) + c_3 \cos(\lambda s) \quad (30b)$$

[0163] 当 $EI \kappa^2 - F = 0$

$$u(s) = c_0 + c_1 s + c_2 s^2 + c_3 s^3 \quad (30c)$$

[0165] 其中, $c_0 - c_3$ 是四个待定恒量。第三个方程式是三次方程式, 所以, 三次样条是一个候选解, 即使它们代表零轴向载荷的特定情形。方程式 (30a) 可用于限定所谓拉力-样条, 且方程式 (30b) 可用于限定“压缩”样条。在下节中利用钻柱的解作为插值函数对此进行证明。

[0166] 钻柱的解作为插值函数

[0167] 如在上面样条并眼轨迹一节中所证明的, 一组插值函数 $f_{ij}(s)$, $s \in [s_j, s_{j+1}]$ 需要有以下性质:

$$[0168] \quad f_{1j}(s_j) = 1, \quad \frac{df_{1j}(s_j)}{ds} = 0, \quad f_{1j}(s_{j+1}) = 0, \quad \frac{df_{1j}(s_{j+1})}{ds} = 0$$

$$[0169] \quad f_{2j}(s_j) = 0, \quad \frac{df_{2j}(s_j)}{ds} = 1, \quad f_{2j}(s_{j+1}) = 0, \quad \frac{df_{2j}(s_{j+1})}{ds} = 0 \quad (31)$$

$$[0170] \quad f_{3j}(s_j) = 0, \quad \frac{df_{3j}(s_j)}{ds} = 0, \quad f_{3j}(s_{j+1}) = 1, \quad \frac{df_{3j}(s_{j+1})}{ds} = 0$$

$$[0171] \quad f_{4j}(s_j) = 0, \quad \frac{df_{4j}(s_j)}{ds} = 0, \quad f_{4j}(s_{j+1}) = 0, \quad \frac{df_{4j}(s_{j+1})}{ds} = 1$$

[0172] 例如, 以下三次函数满足方程式 (31) 的要求:

$$[0173] \quad f_{1j}(s) = 1 + (2\xi - 3)\xi^2$$

$$[0174] \quad f_{2j}(s) = \xi(\xi - 1)^2(s_{j+1} - s_j)$$

$$[0175] \quad f_{3j}(s) = (3 - 2\xi)\xi^2 \quad (32)$$

$$[0176] \quad f_{4j}(s) = \xi^2(\xi - 1)(s_{j+1} - s_j)$$

$$[0177] \quad \xi = \frac{s - s_j}{s_{j+1} - s_j}$$

[0178] 方程式 (32) 所限定的三次样条函数不是唯一的可能解。与钻柱的解有直接联系的替代公式是拉力样条:

$$\begin{aligned}
[0179] \quad f_{1j}(\xi) &= 1 + \frac{[\cosh(\lambda) - 1][1 - \cosh(\lambda\xi)]}{\lambda \sinh(\lambda) + 2[1 - \cosh(\lambda)]} - \frac{\sinh(\lambda)[\lambda\xi - \sinh(\lambda\xi)]}{\lambda \sinh(\lambda) + 2[1 - \cosh(\lambda)]} \\
[0180] \quad f_{2j}(\xi) &= \left\{ \xi - \frac{[\sinh(\lambda) - \lambda \cosh(\lambda)][1 - \cosh(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sinh(\lambda) + 2\lambda[1 - \cosh(\lambda)]} - \frac{[\lambda \sinh(\lambda) + 1 - \cosh(\lambda)][\lambda\xi - \sinh(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sinh(\lambda) + 2\lambda[1 - \cosh(\lambda)]} \right\} (s_{j+1} - s_j) \\
[0181] \quad f_{3j}(\xi) &= \frac{[1 - \cosh(\lambda)][1 - \cosh(\lambda\xi)]}{\lambda \sinh(\lambda) + 2[1 - \cosh(\lambda)]} + \frac{\sinh(\lambda)[\lambda\xi - \sinh(\lambda\xi)]}{\lambda \sinh(\lambda) + 2[1 - \cosh(\lambda)]} \quad (33) \\
[0182] \quad f_{4j}(\xi) &= \left\{ \frac{[\sinh(\lambda) - \lambda][1 - \cosh(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sinh(\lambda) + 2\lambda[1 - \cosh(\lambda)]} + \frac{[1 - \cosh(\lambda)][\lambda\xi - \sinh(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sinh(\lambda) + 2\lambda[1 - \cosh(\lambda)]} \right\} (s_{j+1} - s_j) \\
[0183] \quad \xi &= \frac{s - s_j}{s_{j+1} - s_j}
\end{aligned}$$

[0184] 其中, λ 是待定参数。对于梁-柱解,

$$[0185] \quad \lambda = \Delta s \sqrt{\frac{\tilde{F}}{EI}} \quad (34)$$

$$[0186] \quad \tilde{F} = F - EI\kappa^2 > 0$$

[0187] 处于压缩状态的杆的类似解是

$$\begin{aligned}
[0188] \quad f_{1j}(\xi) &= 1 - \frac{[\cos(\lambda) - 1][1 - \cos(\lambda\xi)]}{\lambda \sin(\lambda) - 2[1 - \cos(\lambda)]} - \frac{\sin(\lambda)[\lambda\xi - \sin(\lambda\xi)]}{\lambda \sin(\lambda) - 2[1 - \cos(\lambda)]} \\
[0189] \quad f_{2j}(\xi) &= \left\{ \xi + \frac{[\sin(\lambda) - \lambda \cos(\lambda)][1 - \cos(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sin(\lambda) - 2\lambda[1 - \cos(\lambda)]} - \frac{[\lambda \sin(\lambda) - 1 + \cos(\lambda)][\lambda\xi - \sin(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sin(\lambda) - 2\lambda[1 - \cos(\lambda)]} \right\} (s_{j+1} - s_j) \\
[0190] \quad f_{3j}(\xi) &= \frac{[\cos(\lambda) - 1][1 - \cos(\lambda\xi)]}{\lambda \sin(\lambda) - 2[1 - \cos(\lambda)]} + \frac{\sin(\lambda)[\lambda\xi - \sin(\lambda\xi)]}{\lambda \sin(\lambda) - 2[1 - \cos(\lambda)]} \quad (35) \\
[0191] \quad f_{4j}(\xi) &= \left\{ -\frac{[\sin(\lambda) - \lambda][1 - \cos(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sin(\lambda) - 2\lambda[1 - \cos(\lambda)]} + \frac{\lambda[\cos(\lambda) - 1][\lambda\xi - \sin(\lambda\xi)]}{\lambda^2 \sin(\lambda) - 2\lambda[1 - \cos(\lambda)]} \right\} (s_{j+1} - s_j) \\
[0192] \quad \xi &= \frac{s - s_j}{s_{j+1} - s_j}
\end{aligned}$$

[0193] 其中, λ 是待定参数。对于梁-柱的解,

$$[0194] \quad \lambda = \Delta s \sqrt{\frac{-\tilde{F}}{EI}} \quad (36)$$

$$[0195] \quad \tilde{F} = F - EI\kappa^2 < 0$$

[0196] 一个问题是:系数 λ 是获得求解扭矩-阻力方程式后才得知的轴向力函数。实践中, λ 一般很小,因此,该解近似于三次方程式。三次插值函数可用来对轨迹进行近似及求解扭矩-阻力问题。则扭矩-阻力解可用来对该轨迹进行改善,如果必要时可进行迭代。

[0197] 本发明的井眼轨迹模型(也称为样条模型)和标准最小曲率模型,与三个解析井眼轨迹(圆弧、悬链线、螺旋线)的简单比较分别例示于图 2-4。图 2-4 所例示的位移比较表明最小曲率模型和样条模型与图 2 中的解析井眼轨迹(圆弧)、图 3 中的解析井眼轨迹(悬链线)以及图 4 中的解析井眼轨迹(螺旋线)匹配。对于螺旋线,虽只显示了一个位移,但代表了其他位移。样条模型还用于计算图 5 所例示的解析井眼轨迹(悬链线)曲率的变化率,及图 6 所例示的解析井眼轨迹(螺旋线)的几何扭曲。尽管图 2-4 例示出了简单比较的结果,图 5-6 中的比较所例示的结果表明最小曲率模型在计算图 5 所例示的悬链线井眼轨迹的曲率变化率或图 6 所例示的螺旋线井眼轨迹的几何扭曲时的缺陷。最小曲率模型预测图 5-6 所比较的两个量均为零,不能进行绘制。然而,样条模型精确地确定了这两个量,虽然在计算几何扭曲时明显存在一些端效应。归因于本发明(样条模型)的其他优点通过下述实例证明。

[0198] 扭矩 - 阻力计算

[0199] 利用现有技术中已知的综合扭矩 - 阻力模型进行扭矩 - 阻力计算。类似地,利用现有技术中已知的方法对平衡方程式进行积分。但是,求解中的唯一不同之处是轨迹模型的选择。

[0200] 实例 1

[0201] 在本实例中,理想的钻井设计的阻力和扭矩性质基于 Sheppard, M. C., Wick, C. 和 Burgess, T. M. 在 Society of Petroleum Engineers 上的文章“Designing Well Paths to Reduce Drag and Torque”中所描述的井 3。现在参照图 7,模型轨迹上的固定点如下:i)认为井竖直地钻到 2400ft 深度的 KOP;ii)以 $5^{\circ}/100\text{ft}$ 的比率创建倾角;以及 iii)目标位置设定为竖直深度 9000ft,水平偏移打井机位置达 6000ft。在用常规的创建切向井孔法(build-tangent well)进行钻孔时,将会达到相应的 44.5° 井孔偏移。钻柱模型构造造成 372 英尺的 6.5 英寸钻环 (99.55lbf./ft) 和 840ft 的 5 英寸超重管 (50.33lbf./ft),并利用至该表面的 5 英寸钻杆 (20.5lbf./ft)。所用的泥浆重量为 9.8lbm/gal。在本实例中,利用摩擦系数为 0.4 的值来模拟苛刻的条件。扭矩 - 损失计算时具有 38000lbf 的 WOB 和 24500ft.-lbf 的表面扭矩的假设。

[0202] 在零摩擦时计算的钩载荷是对于圆弧模型为 192202lbf.,对于样条模型为 192164lbf.,与数据表的计算结果 192203lbf. 形成比较。微小的差值 (38lbf.) 是由于样条与指定的直线/圆弧形存在微小的形状偏差(由于平滑度要求),这是最小曲率模型的精确复制。除样条轨迹的微小差别外,两个模型在轴向力计算的所有其他方面是相同的。停机且摩擦系数为 0.4 时,钩载荷对于圆弧模型为 313474lbf.,对于样条模型为 319633lbf.,存在 6159lbf. 的差值。如果根据零摩擦基准线进行计算,这表示轴向力载荷存在 5% 的差值。表面扭矩为 24500ft.-lbs. 时,钻头处的扭矩对于最小曲率模型为 3333ft.-lbs.,且对于样条模型为 2528ft.-lbs.。这表示在分布的扭矩方面两个模型之间存在 4% 的差值。图 8 例示出了通过增斜井段的钻柱的弯矩。显然,最小曲率模型的确给出了比样条模型更小的弯矩,但是样条模型的结果更平滑。

[0203] 由于该情形具有相对轻微的增斜率,以及增斜井段仅占总井孔深度的 8%,希望可以看到样条公式对此产生相对小的影响。因为经典扭矩 - 阻力分析历史性地给出了良好的结果,两个模型对此情形的一致性证实了全部公式是正确的。

[0204] 实例 2

[0205] 对于要求更高的实例,应用 Grindd, Jan 和 Haugland, Torstein 在 Society of Petroleum Engineers 上的文章“Short Radius TTRD Well with Rig Assisted Snubbing on the Veslefrikk Field”中所描述的短半径井眼。现在参照图 9A 和 9B,分别例示出了井路径的端部的俯视图和水平视图。本实例的增斜率为 $42^{\circ}/30\text{m}$,约是实例 1 中第一情形的增斜率的 10 倍。如图 10 所例示,由于样条模型在增斜端的接触力是最小曲率模型的 4 倍,通过忽略弯矩忽略了一些接触力。图 11 例示出了本实例的弯矩。最小曲率模型仍然提供了比样条模型更小的弯矩,但是样条模型的结果仍然平滑得多。

[0206] 现在参照图 12,流程图例示了用于实施本发明的方法 1200 的一种具体实施方式。

[0207] 在步骤 1202 中,获得每个测量点 (j) 的测量数据。

[0208] 在步骤 1204 中,利用每个相应测量点的测量数据计算每个测量点的切向量 (t_j^v)。

[0209] 在步骤 1206 中,计算每个测量点处的特定法向量(n_j^*)和特定副法向量(b_j^*)。

[0210] 在步骤 1208 中,利用每个相应测量点处的切向量、特定法向量和特定副法向量计算块三角矩阵。

[0211] 在步骤 1210 中,利用块三角矩阵,沿每个相应测量点处的特定法向量方向计算每个测量点的系数(α_j),以及沿每个相应测量点处的特定副法向量方向计算每个测量点的另一系数(β_j)。

[0212] 在步骤 1212 中,利用每个相应测量点处的切向量的一阶导数、该系数和另一系数,计算每个测量点处的井眼曲率(κ_j)和法向量(k_j)。

[0213] 在步骤 1214 中,利用每个相应测量点处的井眼曲率、切向量和法向量,计算测量点之间的每个间隔的切向量插值函数($t_j^v(s)$)。

[0214] 在步骤 1216 中,利用扭矩-阻力钻柱模型中的每个切向量插值函数确定井眼轨迹。

[0215] 尽管已结合本优选实施方式对本发明进行了描述,但可以理解,对于本领域的技术人员而言,并非意图将本发明限制于那些实施方式。例如,本发明还可适用于模拟在化工厂和制造设施中常用的其他管轨迹。因此,可以设想,在没有脱离本发明所附权利要求书及其等同物所限定的精神和范围的情况下,可以有各种可替换的实施方式和修改。

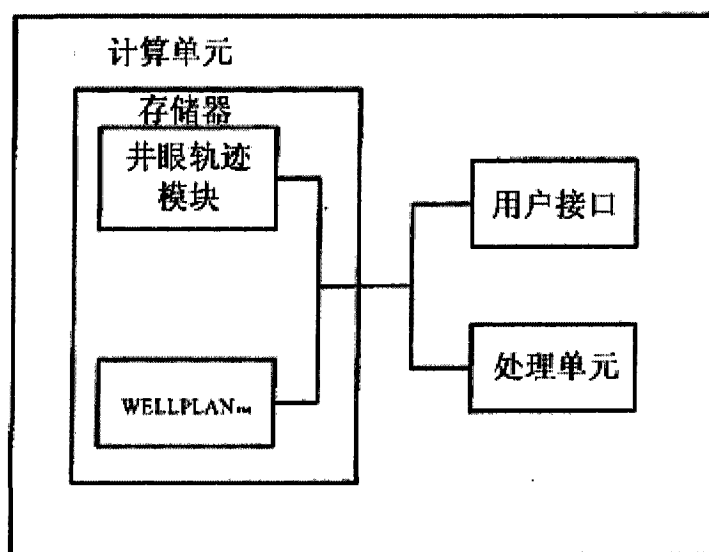


图 1

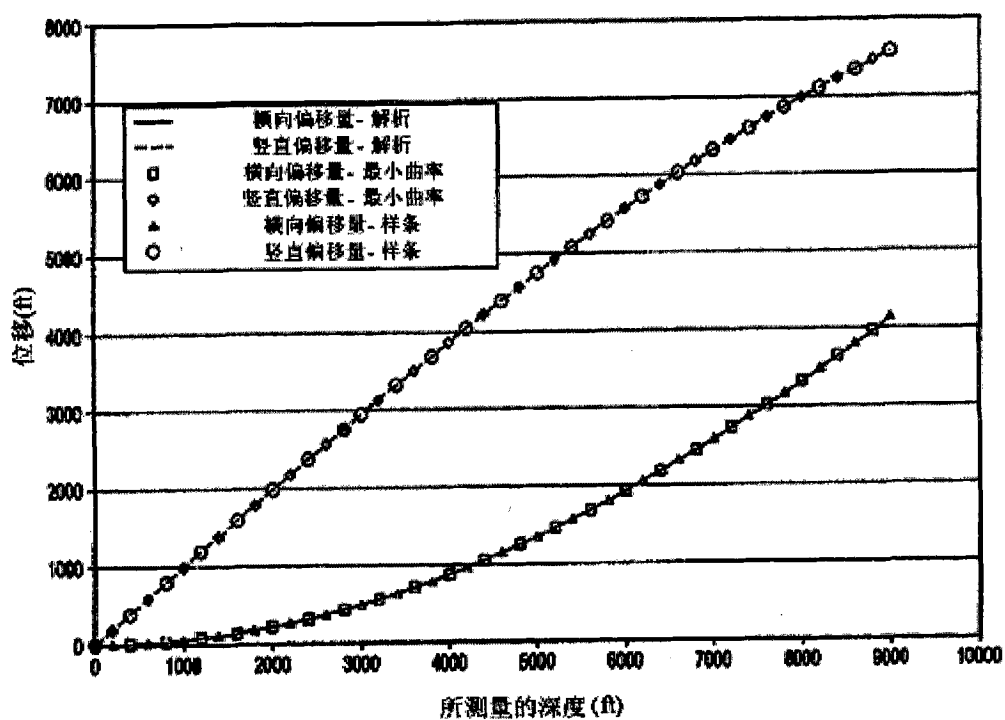


图 2

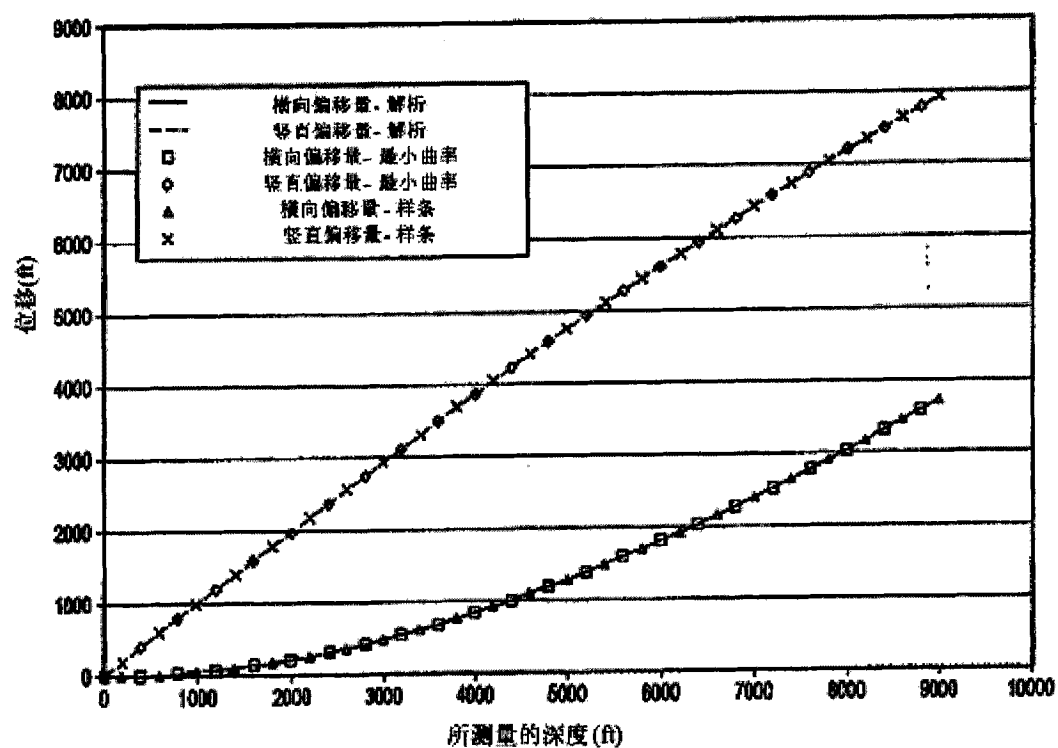


图 3

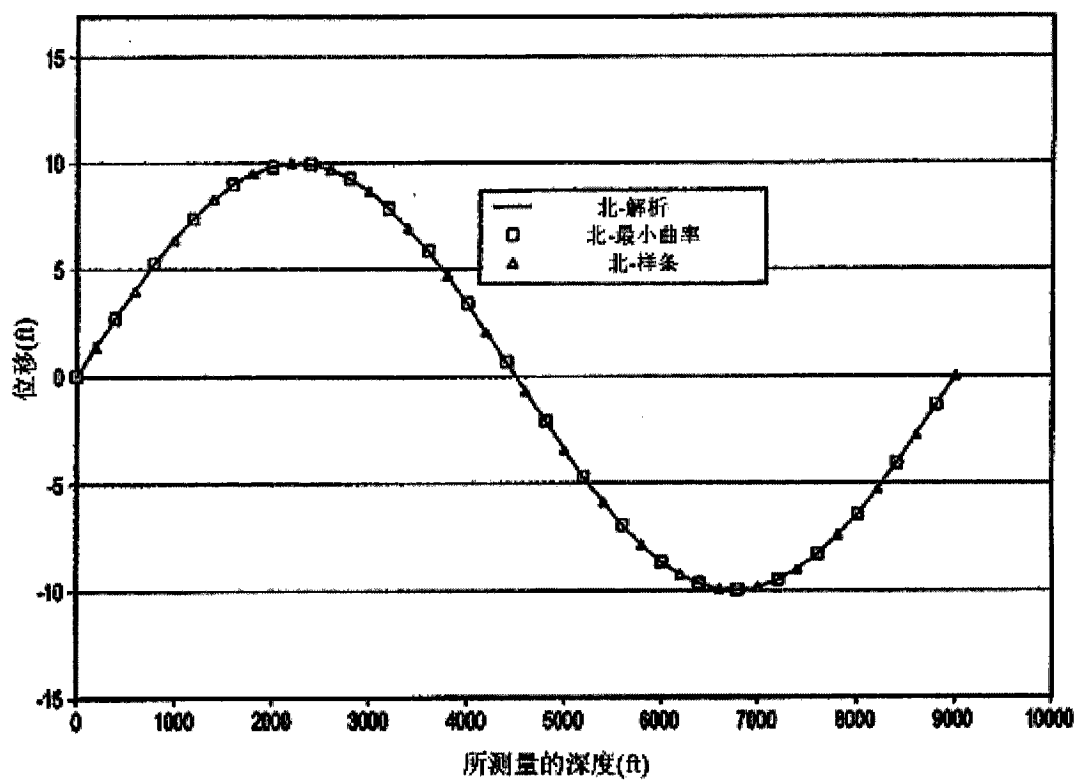


图 4

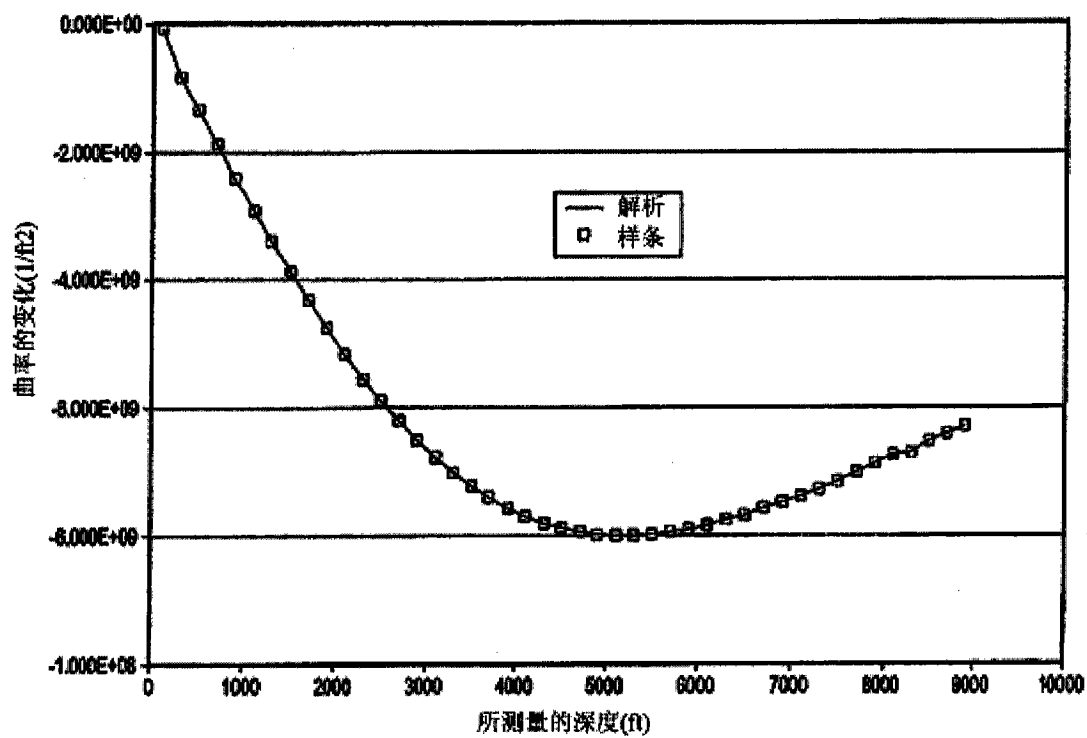


图 5

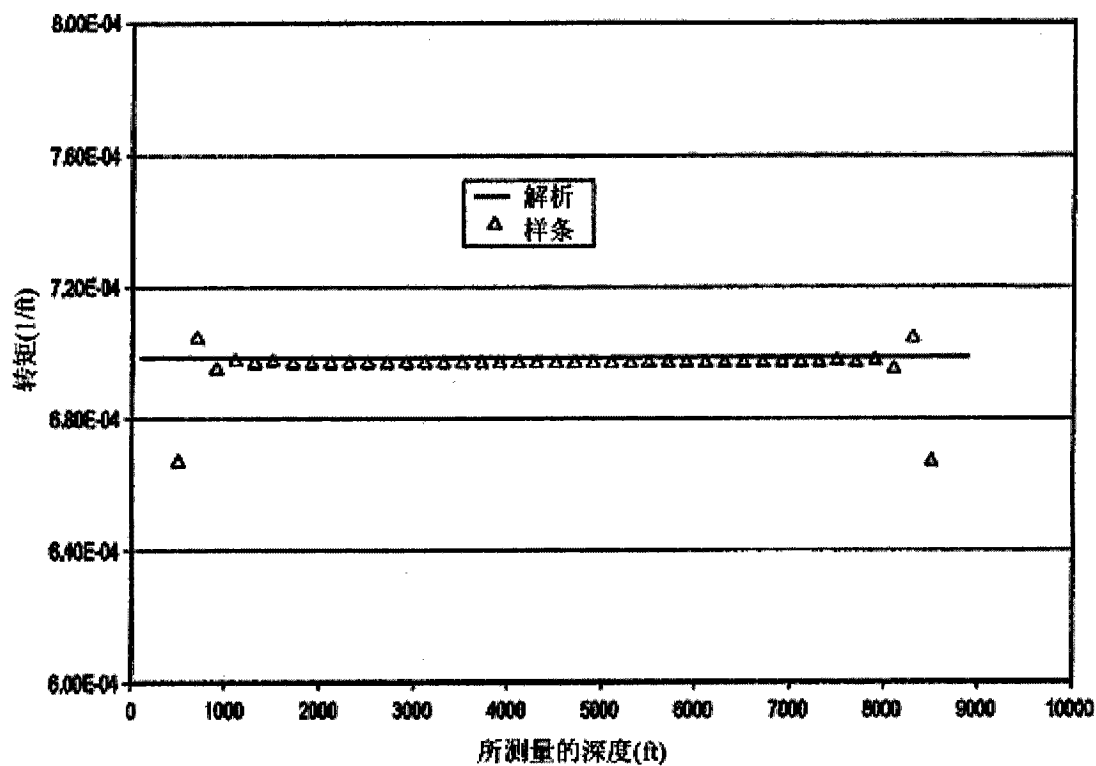


图 6

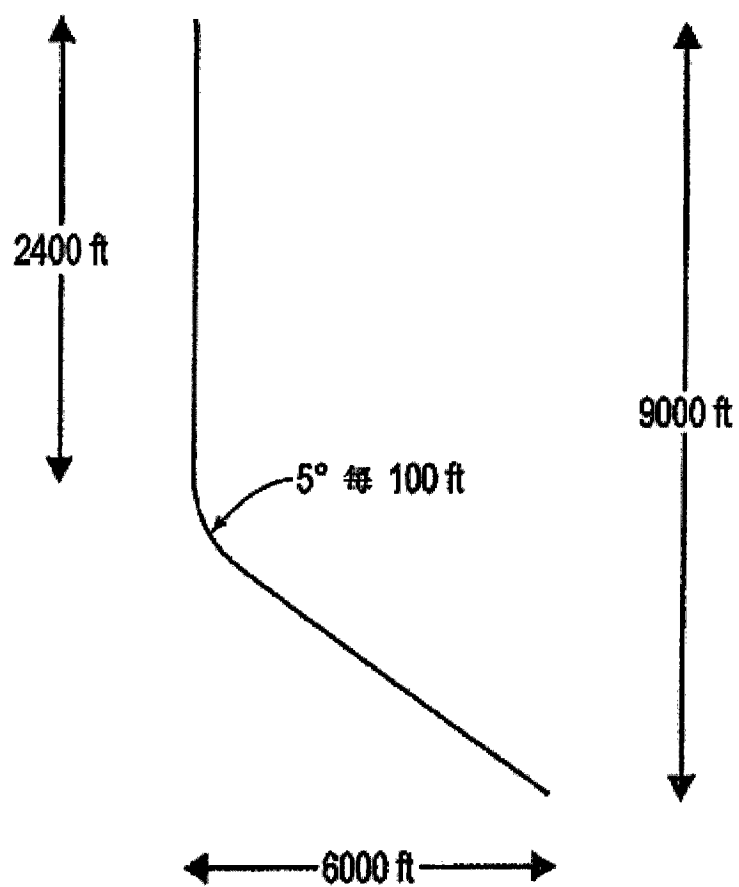


图 7

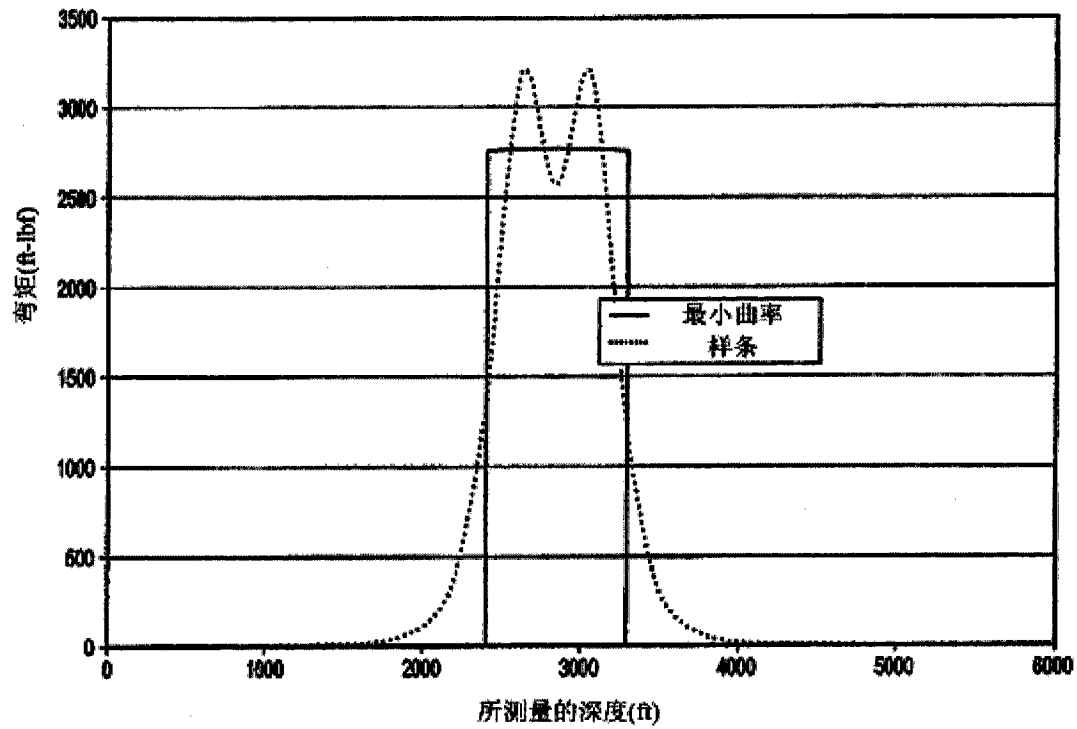


图 8

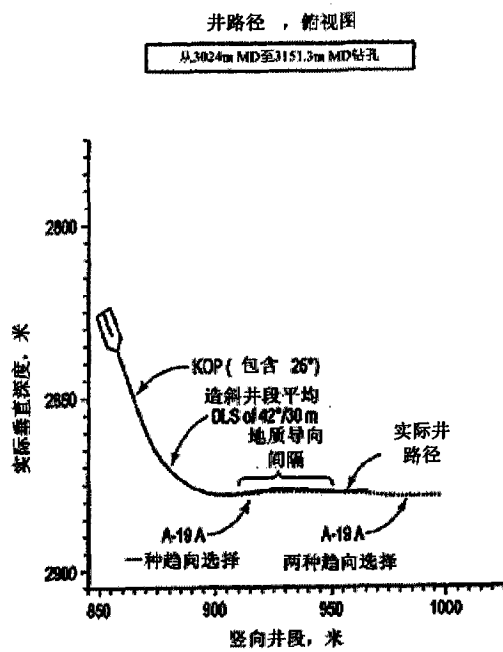


图 9A

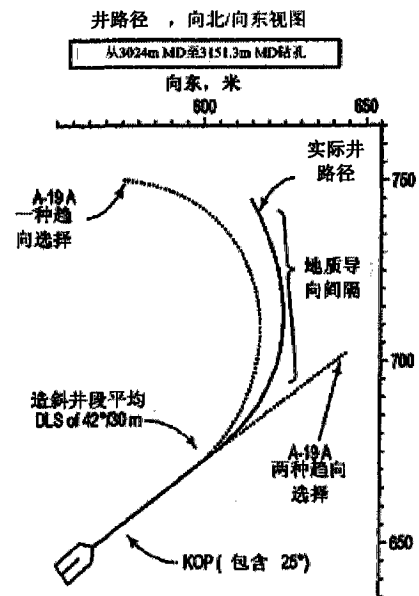


图 9B

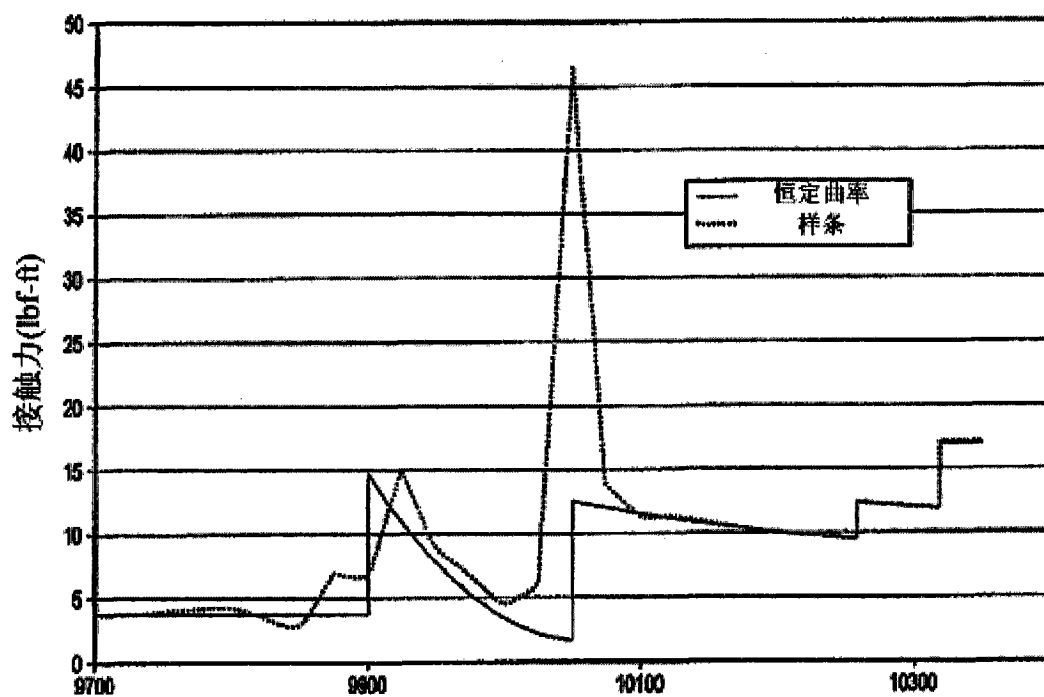


图 10

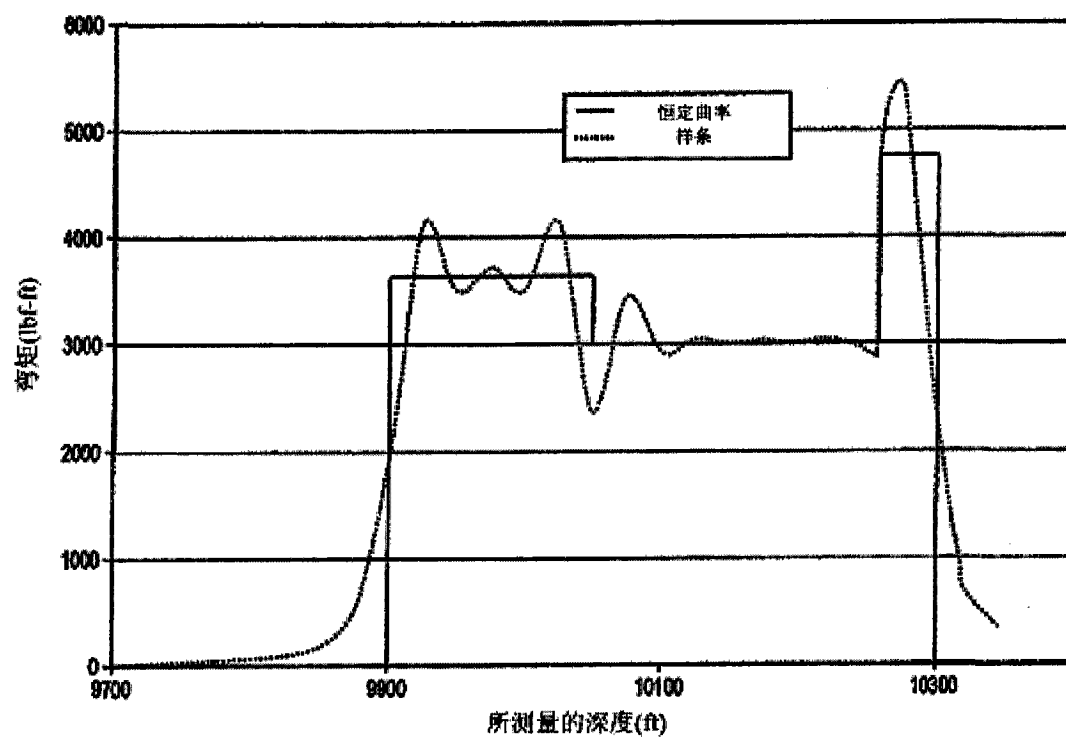


图 11

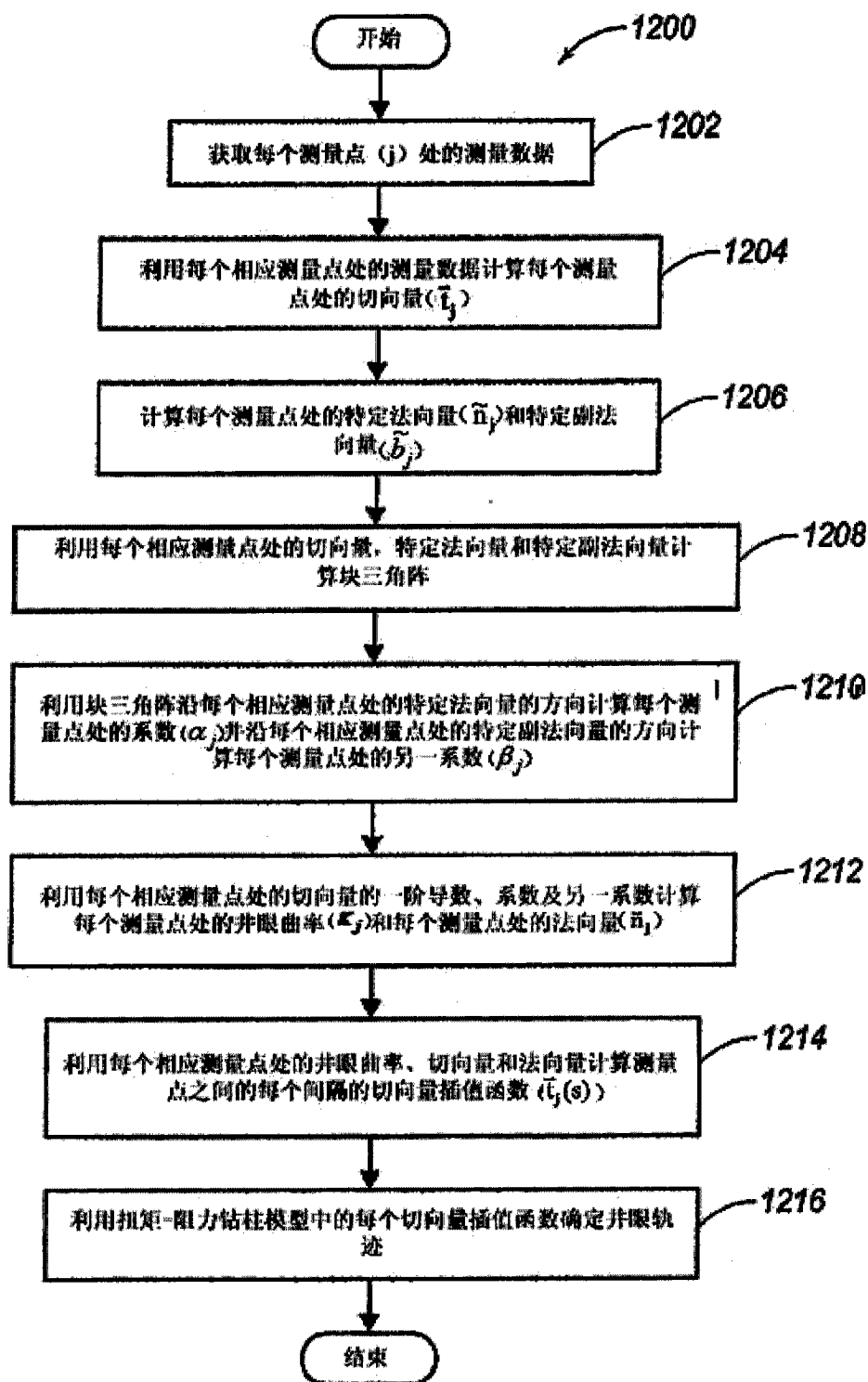


图 12