



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113076649 A

(43) 申请公布日 2021.07.06

(21) 申请号 202110379349.0

(22) 申请日 2021.04.08

(71) 申请人 西南石油大学

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72) 发明人 毛良杰 马茂原 刘清友 蔡明杰

(74) 专利代理机构 四川力久律师事务所 51221  
代理人 钟勤

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

E21B 47/00 (2012.01)

G06F 111/04 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

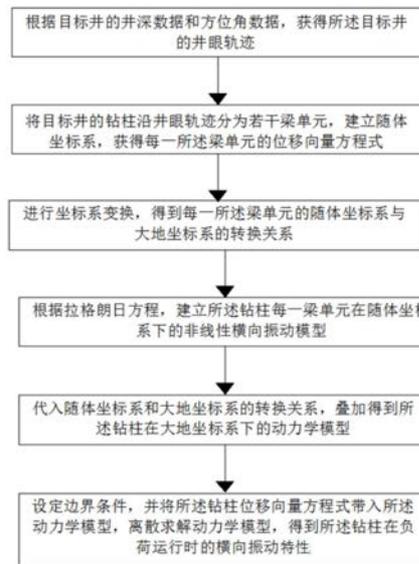
权利要求书2页 说明书13页 附图11页

(54) 发明名称

一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法

(57) 摘要

本发明公开了一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法,涉及油气开发技术领域,包括以下步骤S1:获得所述目标井的井眼轨迹;S2:建立随体坐标系,获得位移向量方程式;S3:进行坐标系变换,得到每一所述梁单元的随体坐标系与大地坐标系的转换关系;S4:根据拉格朗日方程,建立所述钻柱每一梁单元在随体坐标系下的非线性横向振动模型,进行坐标系转换并叠加得到所述钻柱在大地坐标系下的动力学模型;S5:设定边界条件,离散求解动力学模型,得到所述钻柱在负荷运行时的横向振动曲线。本发明建立钻柱在负荷运行过程中的非线性横向振动模型,得到钻柱的动态振动特性预测模型,对钻柱在动态负荷情况下的振动特性预测更加准确。



1. 一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

S1: 根据目标井的井深数据和方位角数据, 获得所述目标井的井眼轨迹;

S2: 将目标井的钻柱沿井眼轨迹分为若干梁单元, 并以目标井的井眼轨迹向为X轴建立随体坐标系, 获得每一所述梁单元的位移向量方程式;

S3: 将每一梁单元建立的随体坐标系进行坐标系变换, 得到每一所述梁单元的随体坐标系与大地坐标系的转换关系;

S4: 根据拉格朗日方程, 建立所述钻柱每一梁单元在随体坐标系下的非线性横向振动模型, 并代入随体坐标系和大地坐标系的转换关系, 叠加得到所述钻柱在大地坐标系下的动力学模型;

S5: 设定所述钻柱边界条件, 并将所述钻柱位移向量方程式带入所述动力学模型, 离散求解动力学模型, 得到所述钻柱在负荷运行时的横向振动曲线。

2. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法, 其特征在于, 在步骤S1中, 所述井眼轨迹采用三次样条插值方法获得。

3. 根据权利要求2所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法, 其特征在于, 所述井眼轨迹采用以下步骤得到:

S11: 沿所述目标井选取若干个测点, 测井获得若干个所述目标井的井深数据、方位角数据、井斜角数据;

S12: 根据曲率半径法计算每一测点的坐标;

S13: 根据三次样条插值方法得到所述目标井的井眼轨迹。

4. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法, 其特征在于, 每一所述梁单元的位移向量方程式为:

$$\{U_i\}_e = [x_i, y_i, z_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, x_j, y_j, z_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}];$$

其中,  $x_i, y_i, z_i$  为每一梁单元的一节点的坐标;  $x_j, y_j, z_j$  分别为每一梁单元的另一节点的坐标;  $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}$  分别为每一梁单元两个节点绕坐标轴转动的转角。

5. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法, 其特征在于, 所述随体坐标系和大地坐标系的转换关系为:

$$[Tr] = \begin{bmatrix} Trans & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Trans & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Trans & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Trans \end{bmatrix}$$

其中, Trans为转换矩阵;

所述转换矩阵为:

$$Trans = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\gamma} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} & \sin \tilde{\beta} \\ \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} - \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} \\ -\cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} + \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\varphi} \end{bmatrix}$$

其中,  $\tilde{\varphi}$  为随体坐标系转化为大地坐标系时X轴的旋转角度;  $\tilde{\beta}$  为随体坐标系转化为大地坐标系时Y轴的旋转角度;  $\tilde{\lambda}$  为随体坐标系转化为大地坐标系时Z轴的旋转角度。

6. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法,其特征在于,所述梁单元在非线性的横向振动模型为:

$$[M]_e \{\ddot{U}\}_e + [C]_e \{\dot{U}\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e$$

其中,  $\{\ddot{U}\}_e, \{\dot{U}\}_e, \{U\}_e, \{F\}_e$  分别为随体坐标系下的广义加速度、广义速度、广义位移及外力矢量;  $[M]_e, [C]_e$  和  $[K]_e$  分别表示随体坐标系下的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

7. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法,其特征在于,所述钻柱在大地坐标系下的动力学模型为:

$$[M']\{\ddot{U}'\} + [C']\{\dot{U}'\} + [K']\{U'\} = \{F'\}$$

其中,  $\{\ddot{U}'\}, \{\dot{U}'\}, \{U'\}, \{F'\}$  分别为钻柱上各节点大地坐标系下的广义加速度、广义速度、广义位移及外力矢量;  $[M'], [C']$  和  $[K']$  分别钻柱表示大地坐标系下的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

8. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法,其特征在于,所述钻柱边界条件包括井壁约束条件和钻头约束条件,所述井壁约束条件为:

$$x_i = 0, y_i = 0, z_i = 0, \theta_x = \Omega t, \theta_y = 0, \theta_z = 0;$$

其中,  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  分别为钻柱单元绕各坐标轴的转角;  $\Omega$  是指钻柱的转速, rad/s;  $t$  表示时间, s。

9. 根据权利要求1所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法,其特征在于,步骤S5中,所述动力学模型采用广义- $\alpha$ 法离散求解。

10. 根据权利要求1~9任一项所述的复杂结构井钻柱横向振动分析方法,其特征在于,所述预测方法还基于以下假设:

井筒为等截面圆,井眼轨迹连续光滑;

将钻柱视为具有均匀材料和集合特性的三维弹性梁,其变形在弹性范围内;

不考虑钻柱上及其他设备与钻柱连接处的连接螺纹和局部孔板;

将扶正器被视为大尺寸、短长度的钻柱。

## 一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及石油和天然气开发技术领域,特别涉及一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法。

### 背景技术

[0002] 在油气井钻井施工中钻柱是最容易产生故障及损坏的部分,钻柱的疲劳寿命及使用强度限制这钻井施工的工艺和施工进度。钻柱在工况条件恶劣而且受力复杂的条件下,受到磨损、腐蚀以及非正常破坏时会加速钻柱的断裂、刺漏失效,钻具所处的工况条件,地质条件等因素的影响使钻柱的疲劳寿命难以预测,导致在设计钻井工艺及施工进度中难以有效控制钻柱的疲劳寿命。在深井、超深井、定向井和水平井等复杂结构井的井下,钻柱所受的应力更加复杂,钻柱失效问题尤为突出。

[0003] 钻柱的失效形式包括磨损、裂纹、刺漏、变形等,不仅大大增加了钻井成本,而且增加了起下钻作业时间,极大地阻碍了正常钻井作业,降低了机械钻速。一般而言,造成钻柱失效最重要的原因是钻柱振动,但现有的钻柱振动预测集中在静态的钻柱或者平衡状态下,这难以准确的反应钻柱实际负荷运行过程中的振动,因此对钻柱失效预测和安全施工指导意义较小。因此如何预测钻柱在负荷过程中的动态振动,对于钻柱失效预测和钻井安全施工具有重要的意义。

### 发明内容

[0004] 本申请的目的在于现有技术中预测钻柱疲劳寿命的方法结果有效性不高的问题,提供一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法,建立钻柱在负荷运行过程中的非线性横向振动模型,得到钻柱的动态振动特性预测模型,对钻柱在动态负荷情况下的振动特性预测更加准确,为钻柱失效预测和为钻井安全施工提供可靠的数据参考。

[0005] 为了实现上述发明目的,本申请提供了以下技术方案:一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法,包括以下步骤:

[0006] S1:根据目标井的井深数据和方位角数据,获得所述目标井的井眼轨迹;

[0007] S2:将目标井的钻柱沿井眼轨迹分为若干梁单元,并以目标井的井眼轨迹向为X轴建立随体坐标系,获得每一所述梁单元的位移向量方程式;

[0008] S3:将每一梁单元建立的随体坐标系进行坐标系变换,得到每一所述梁单元的随体坐标系与大地坐标系的转换关系;

[0009] S4:根据拉格朗日方程,建立所述钻柱每一梁单元在随体坐标系下的非线性横向振动模型,并代入随体坐标系和大地坐标系的转换关系,叠加得到所述钻柱在大地坐标系下的动力学模型;

[0010] S5:设定所述钻柱边界条件,并将所述钻柱位移向量方程式带入所述动力学模型,离散求解动力学模型,得到所述钻柱在负荷运行时的横向振动曲线。

[0011] 进一步地,在步骤S1中,所述井眼轨迹采用三次样条插值方法获得。

[0012] 进一步地,所述井眼轨迹采用以下步骤得到:

[0013] S11:沿所述目标井选取若干个测点,测井获得若干个所述目标井的井深数据、方位角数据、井斜角数据;

[0014] S12:根据曲率半径法计算每一测点的坐标;

[0015] S13:根据三次样条插值方法得到所述目标井的井眼轨迹。

[0016] 进一步地,每一所述梁单元的位移向量方程式为:

$$[0017] \quad \{U_i\}_e = [x_i, y_i, z_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, x_j, y_j, z_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}];$$

[0018] 其中,  $x_i, y_i, z_i$  为每一梁单元的一节点的坐标;  $x_j, y_j, z_j$  分别为每一梁单元的另一节点的坐标;  $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}$  分别为每一梁单元两个节点绕坐标轴转动的转角。

[0019] 进一步地,所述随体坐标西和大地坐标系的转换关系为:

$$[0020] \quad [Tr] = \begin{bmatrix} Trans & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Trans & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Trans & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Trans \end{bmatrix}$$

[0021] 其中,Trans为转换矩阵;

[0022] 所述转换矩阵为:

$$[0023] \quad Trans = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\gamma} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} & \sin \tilde{\beta} \\ \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} - \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} \\ -\cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} + \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\varphi} \end{bmatrix}$$

[0024] 其中,  $\tilde{\varphi}$  为随体坐标系转化为大地坐标系时X轴的旋转角度;  $\tilde{\beta}$  为随体坐标系转化为大地坐标系时Y轴的旋转角度;  $\tilde{\lambda}$  为随体坐标系转化为大地坐标系时Z轴的旋转角度。

[0025] 进一步地,所述梁单元在的非线性横向振动模型为:

$$[0026] \quad [M]_e \{\ddot{U}\}_e + [C]_e \{\dot{U}\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e$$

[0027] 其中,  $\{\ddot{U}\}_e, \{\dot{U}\}_e, \{U\}_e, \{F\}_e$  分别为随体坐标系下的广义加速度、广义速度、广义位移及外力矢量;  $[M]_e, [C]_e$  和  $[K]_e$  分别表示随体坐标系下的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

[0028] 进一步地,在大地坐标系下的钻柱的动力学模型为:

$$[0029] \quad [M'] \{\ddot{U}'\} + [C'] \{\dot{U}'\} + [K'] \{U'\} = \{F'\}$$

[0030] 其中,  $\{\ddot{U}'\}, \{\dot{U}'\}, \{U'\}, \{F'\}$  分别为钻柱上各节点大地坐标系下的广义加速度、广义速度、广义位移及外力矢量;  $[M'], [C']$  和  $[K']$  分别钻柱表示大地坐标系下的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

[0031] 进一步地,所述钻柱边界条件包括井壁约束条件和钻头约束条件,所述井壁约束条件为:

$$[0032] \quad x_i = 0, y_i = 0, z_i = 0, \theta_x = \Omega t, \theta_y = 0, \theta_z = 0;$$

[0033] 其中,  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  分别为钻柱绕各坐标轴的转角;  $\Omega$  是指钻柱的转速, rad/s;  $t$  表示时间, s。

[0034] 进一步地,步骤S5中,所述动力学模型采用广义- $\alpha$ 法离散求解。

[0035] 进一步地,所述预测方法还基于以下假设:

[0036] (1) 井筒为等截面圆,井眼轨迹连续光滑;

[0037] (2) 将钻柱视为具有均匀材料和集合特性的三维弹性梁,其变形在弹性范围内;

[0038] (3) 不考虑钻柱上及其他设备与钻柱连接处的连接螺纹和局部孔板;

[0039] (4) 将扶正器被视为大尺寸、短长度的钻柱。

[0040] 与现有技术相比,本发明的具有以下有益效果:本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法,根据拉格朗日方程建立钻柱动力学模型,并充分考虑钻柱在实际负荷情况下的横向位移情况,利用广义- $\alpha$ 法进行动力学模型的离散求解,得到钻柱在负荷运行时的横向振动预测模型。同时,本发明还根据复杂结构井复杂的井眼轨迹,进行坐标系转换,将非线性横向振动模型转换为可以叠加的动力学模型,便于动力学模型的离散求解。此外,本发明还采用三次样条插值方法得到井眼轨迹,使得到的井眼轨迹更连续、更光滑。

[0041] 本发明所采用的复杂结构井钻柱横向振动分析方法考虑了钻柱在负荷工作时的位移和与井壁的碰撞,得到了钻柱在负荷过程中的动力学模型,其假设条件少,更符合钻柱在负荷工作时的实际情况,使其预测得到的钻柱横向振动曲线对钻柱施工、应用过程具有更好的参考、指导作用。

## 附图说明

[0042] 图1为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法的流程示意图;

[0043] 图2为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法中梁单元的两个节点坐标示意图;

[0044] 图3为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法中每一梁单元的重力模型;

[0045] 图4为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法中坐标系转换示意图;

[0046] 图5为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法中钻柱与井壁碰撞受力示意图;

[0047] 图6为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法中动力学模型求解流程示意图;

[0048] 图7为本发明公开的实施例中得到井眼轨迹示意图;

[0049] 图8为本发明公开的实施例中模拟得到的钻柱横向振动特性与现场实测数据对比图;

[0050] 图9~15为本发明公开的复杂结构井钻柱横向振动分析方法中的质量矩阵、陀螺阻尼、刚度矩阵、非刚度矩阵。

## 具体实施方式

[0051] 下面结合试验例及具体实施方式对本发明作进一步的详细描述。但不应将此理解为本发明上述主题的范围仅限于以下的实施例,凡基于本发明内容所实现的技术均属于本发明的范围。

[0052] 现有技术中,钻柱振动预测主要集中在静态的钻柱或者平衡状态下,这难以准确的反应钻柱实际负荷运行过程中的振动,因此对钻柱失效预测和安全施工指导意义较小。

因此如何预测钻柱在负荷过程中的动态振动,对于钻柱失效预测和钻井安全施工具有重要的意义。

[0053] 基于上述技术问题的考虑,参阅图1,本申请公开了一种复杂结构井钻柱横向振动分析方法,包括以下步骤:

[0054] S1:根据目标井的井深数据和方位角数据,获得所述目标井的井眼轨迹;

[0055] S2:将目标井的钻柱沿井眼轨迹分为若干梁单元,并以目标井的井眼轨迹向为X轴建立随体坐标系,获得每一所述梁单元的位移向量方程式;

[0056] S3:将每一梁单元建立的随体坐标系进行坐标系变换,得到每一所述梁单元的随体坐标系与大地坐标系的转换关系;

[0057] S4:根据拉格朗日方程,建立所述钻柱每一梁单元在随体坐标系下的非线性横向振动模型,并代入随体坐标系和大地坐标系的转换关系,叠加得到所述钻柱在大地坐标系下的动力学模型;

[0058] S5:设定所述钻柱边界条件,并将所述钻柱位移向量方程式带入所述动力学模型,离散求解动力学模型,得到所述钻柱在负荷运行时的横向振动曲线。

[0059] 需要说明的是,本发明基于以下假设:

[0060] (1)井筒为等截面圆,井眼轨迹连续光滑;

[0061] (2)将钻柱视为具有均匀材料和集合特性的三维弹性梁,其变形在弹性范围内;

[0062] (3)不考虑钻柱上及其他设备与钻柱连接处的连接螺纹和局部孔板;

[0063] (4)将扶正器被视为大尺寸、短长度的钻柱。

[0064] 由于复杂结构井钻井过程中,其井眼轨迹并不是绝对垂直的,而是弯曲的空间曲线,其井斜角和方位角随着井深的增加而变化。因此在建立钻柱的动力学模型之前,需要先进行目标井的井眼轨迹构建。

[0065] 在一些实施例中,在步骤S1中,所述井眼轨迹采用以下步骤得到:

[0066] S11:沿所述目标井选取若干个测点,测井获得若干个所述目标井的井深数据、方位角数据、井斜角数据;

[0067] S12:根据曲率半径法计算每一测点的坐标;

[0068] S13:根据三次样条插值方法得到所述目标井的井眼轨迹。

[0069] 需要说明的是,所述复杂在实际钻井工程中,复杂结构井眼的基本数据包括井深、井斜角和方位角,其可以通过随钻测量工具(MWD)获得。

[0070] 在一些实施例中,在步骤S12中,每一测点的坐标通过以下步骤获得:

[0071] S121:根据曲率半径法,可以获得相邻两测点之间的坐标增量:

$$[0072] \begin{cases} \Delta X = R_s (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) \\ \Delta Y = R_s (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \\ \Delta Z = R_H (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \\ \Delta S = R_H (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \end{cases} \quad (1)$$

[0073] 式中, $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ 、 $\Delta S$ 分别为相邻两测点的坐标增量; $R_H$ 和 $R_s$ 分别是井眼轨迹的垂直投影和水平投影的曲率半径,m,下标“1”、“2”分别表示相邻的上、下两个测点。

[0074] 其中, $R_H$ 和 $R_s$ 通过下式计算:

$$[0075] \begin{cases} R_H = \frac{\Delta s}{\Delta \alpha} \\ R_S = \frac{R_H (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}{\Delta \varphi} \\ \Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \\ \Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \\ \Delta s = s_2 - s_1 \end{cases} \quad (2)$$

[0076] 式中,  $\alpha$ ,  $\varphi$  分别是井斜角和方位角, rad;  $S$  是水平投影长度, m;  $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \varphi$  分别为相邻两个测点的井斜角和方位角的增量。

[0077] 需要说明的是, 当  $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \varphi$  其中之一为零时, 则  $R_H$  和  $R_S$  将无法计算, 这时可按如下四种情况处理:

[0078] a) 当  $\Delta \alpha = 0$ ,  $\Delta \varphi \neq 0$  时, 井眼轨迹在垂直剖面内的投影为直线, 有:

$$[0079] \begin{cases} \Delta X = R_S (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) \\ \Delta Y = R_S (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \\ \Delta Z = \Delta s \cos \alpha_1 \\ \Delta S = \Delta s \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (3)$$

[0080] 其中  $R_S = \frac{\Delta s \sin \alpha_1}{\Delta \varphi} = \frac{\Delta s \sin \alpha_2}{\Delta \varphi}$ 。

[0081] b) 当  $\Delta \alpha \neq 0$ ,  $\Delta \varphi = 0$  时, 井眼轨迹的水平投影为一曲线, 有:

$$[0082] \begin{cases} \Delta X = R_H (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \cos \varphi_1 = R_H (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \cos \varphi_2 \\ \Delta Y = R_H (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \sin \varphi_1 = R_H (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \sin \varphi_2 \\ \Delta Z = R_H (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \\ \Delta S = R_H (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \end{cases} \quad (4)$$

[0083] 其中  $R_H = \frac{\Delta s}{\Delta \alpha}$ 。

[0084] c) 当  $\Delta \alpha = 0$ ,  $\Delta \varphi = 0$  时, 井眼轨迹为直线, 有:

$$[0085] \begin{cases} \Delta X = \Delta s \sin \alpha_1 \cos \varphi_1 \\ \Delta Y = \Delta s \cos \alpha_1 \sin \varphi_1 \\ \Delta Z = \Delta s \cos \alpha_1 \\ \Delta S = \Delta s \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (5)$$

[0086] d) 当  $\Delta \alpha \neq 0$ , 但  $\alpha_1 \cdot \alpha_2 = 0$ , 此时井斜角为零处的方位角等于另一端的方位角, 即等效于 b) 中对应的情况, 按照相应方法处理即可。

[0087] S122: 根据相邻两测点之间的坐标增量, 并根据第一个测点的测量数据, 可以依次计算并获得每一测点的坐标值:

$$[0088] \quad \begin{cases} X_2 = X_1 + \Delta X \\ Y_2 = Y_1 + \Delta Y \\ Z_2 = Z_1 + \Delta Z \\ S_2 = S_1 + \Delta S \end{cases} \quad (6)。$$

[0089] 由于测量数据计算的坐标不连续、不光滑,测量间距较大,导致井眼轨迹描述和动力学计算不准确。因此应基于实测数据对其进行处理再得到经验轨迹。一般有两种办法:插值法、逼近法。考虑到逼近法的可操作性不如插值法高,所以在本申请中采用三次样条插值方法重建真实井筒轨迹,优选地,插值间距应等于动态模拟的空间步长。

[0090] 在步骤S2中,将目标井的钻柱沿井眼轨迹分为若干梁单元,每一梁单元有两个节点,每个节点有6个自由度,包括3个平移量(x,y,z),两个横向旋转角( $\theta_y, \theta_z$ )和一个扭转角 $\theta_x$ 。因此,参阅图2,以目标井的井眼轨迹向为X轴可以在每一个节点上均建立随体坐标系,由此可以得到每一所述梁单元的钻柱位移向量方程式为:

$$[0091] \quad \{U_i\}_e = [x_i, y_i, z_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, x_j, y_j, z_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}]；$$

[0092] 其中, $x_i, y_i, z_i$ 为每一梁单元的一节点的坐标; $x_j, y_j, z_j$ 分别为每一梁单元的另一节点的坐标; $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}$ 分别为每一梁单元两个节点绕坐标轴转动的转角。

[0093] 优选地,每一梁单元的长度为3m。

[0094] 由于在复杂结构井井眼中,每个钻柱单元位于不同的方位和井斜。因此,为了结合各单元的运动方程,必须建立一个统一的大地坐标系,使各单元的节点力、节点位移和系数矩阵都可以转化为大地坐标系,以便于从各梁单元的非线性横向振动模型得到整个钻柱非线性横向振动模型。因此,上述建立的随体坐标系需要先进行坐标系转换,其具体转换过程如下:

[0095] 从图3中可以看出,通过旋转随体坐标系将其转换为大地坐标系,其具体旋转角度为:

[0096] 首先绕X轴旋转角度 $\tilde{\varphi}$ ,得到坐标系 $x_1(x) y_1 z_1$ ;其次绕 $y_1$ 轴转的角度 $\tilde{\beta}$ ,得到坐标系 $x_2 y_2 (y_1) z_2$ ;最后绕 $z_2$ 转动角度 $\tilde{\lambda}$ ,得到大地坐标系xyz ( $z_2$ )。

[0097] 因此随体坐标系与大地坐标系的有如下关系:

$$[0098] \quad \begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \tilde{\varphi} & -\sin \tilde{\varphi} \\ 0 & \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \tilde{\beta} & 0 & \sin \tilde{\beta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \tilde{\beta} & 0 & \cos \tilde{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (8) \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \tilde{\gamma} & -\sin \tilde{\gamma} & 0 \\ \sin \tilde{\gamma} & \cos \tilde{\gamma} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \end{aligned}$$

[0099] 从式(8)可以获得随体坐标系与大地坐标系的转换关系为:

$$[0100] \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\gamma} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} & \sin \tilde{\beta} \\ \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} - \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} \\ -\cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} + \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0101] 将其转换矩阵设为Trans,即转换矩阵Trans为:

$$[0102] \quad Trans = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\gamma} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} & \sin \tilde{\beta} \\ \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} - \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & -\cos \tilde{\beta} \sin \tilde{\varphi} \\ -\cos \tilde{\gamma} \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} + \sin \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\varphi} \sin \tilde{\beta} \sin \tilde{\gamma} + \cos \tilde{\gamma} \sin \tilde{\varphi} & \cos \tilde{\beta} \cos \tilde{\varphi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0103] 同时,由于每一梁单元均为包含两个节点、每一节点包括三个平移位移、三个转动位移;因此,所以每一梁单元的位移均为12维矩阵。带入转换矩阵Trans,即可得到每一梁单元的随体坐标系和大地坐标系的转换关系,其具体为:

$$[0104] \quad \{U\}'_e = \begin{bmatrix} Trans & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Trans & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Trans & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Trans \end{bmatrix} \{U\}_e \quad (11)$$

[0105] 设Tr为坐标变换矩阵:

$$[0106] \quad [Tr] = \begin{bmatrix} Trans & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Trans & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Trans & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Trans \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0107] 因此,每一梁单元的广义位移量和广义外力矢量在随体坐标系与大地坐标系的转换关系为:

$$[0108] \quad \{U'\}_e = [Tr] \{U\}_e, \{F'\}_e = [Tr] \{F\}_e \quad (13)$$

[0109] 式中,  $\{U'\}_e$  和  $\{U\}_e$  分别表示随体坐标系和大地坐标系下的广义位移量;  $\{F'\}_e$  和  $\{F\}_e$  分别表示随体坐标系和大地坐标系下的广义外力矢量。

[0110] 在步骤S4中,根据所述拉格朗日方程可以得到所述梁单元在的非线性横向振动模型。

[0111] 其中所述拉格朗日方程为:

$$[0112] \quad \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial(T-V)}{\partial \dot{U}_i} \right] - \frac{\partial(T-V)}{\partial U_i} = F_i \quad (14)$$

[0113] 式中,T为表示动能;V表示势能; $\dot{U}_i$ 表示速度向量; $F_i$ 表示外力矢量; $U_i$ 表示位移量。

[0114] 将T、V的表达式求导,并带入式(14)化简即可得到的所述梁单元在的非线性横向振动模型为:

$$[0115] \quad [M]_e \{\ddot{U}\}_e + [C]_e \{\dot{U}\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e \quad (15)$$

[0116] 式中,  $\{\ddot{U}\}_e, \{\dot{U}\}_e, \{U\}_e, \{F\}_e$  分别为广义加速度、广义速度、广义位移及外力矢量。

$[M]_e, [C]_e, [K]_e$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵。

[0117] 需要说明的是,刚度矩阵  $[K]_e$  包括非线性刚度矩阵和线性刚度矩阵  $[K_L]_e$ ;非线性刚

度矩阵又包括与钻柱弯曲变形和轴向变形相对应的非线性刚度矩阵 $[K_{NA1}] + [K_{NA2}]$ 和钻柱弯曲变形和扭转变形对应的非线性刚度矩阵 $[K_{NT}]$ ;其具体如下:

$$[0118] \quad [K]_e = [K_L] + [K_{NA1}] + [K_{NA2}] + [K_{NT}] \quad (16)$$

[0119] 需要说明的是,所述质量矩阵可表示为:

$$[0120] \quad [M] = [M_1] + [M_2] \quad (17)$$

[0121] 式中, $[M_1]$ 是平动质量矩阵, $[M_2]$ 是转动质量矩阵,参阅图13、图14。

[0122] 阻尼矩阵 $[C]_e$ 可表示为:

$$[0123] \quad [C] = [C_D] + [C_N] \quad (18)$$

[0124] 式中, $[C_D]$ 表示瑞利阻尼, $[C_N]$ 表示陀螺阻尼,参阅图15。

$$[0125] \quad [C_D] = \alpha_D [M] + \beta_D [K_L] \quad (19)$$

[0126] 式中, $\alpha_D$ 、 $\beta_D$ 为常数。

[0127] 需要说明的是,所述广义外力矢量 $\{F\}_e$ 包括每一所述梁单元两个节点所受的离心力和重力,因此所述广义外力矢量的矩阵为12维矩阵。

[0128] 根据图4所示,所述钻柱的每一梁单元在x、y、z三个方向上的重力分量分别为:

$$q_z = q \cos \alpha$$

$$[0129] \quad q_x = q \sin \alpha \quad (20)$$

$$q_y = 0$$

[0130] 式中,q是单位长度钻柱的等效重力,单位N/m; $\alpha$ 是梁单元轴线和垂直方向的夹角。

[0131] 因此,重力矢量的等效节点力为:

$$[0132] \quad F_{grav} = \begin{bmatrix} -\frac{q_x L}{2} & -\frac{q_y L}{2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{q_y L^2}{12} & -\frac{q_x L}{2} & -\frac{q_y L}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{q_x L^2}{12} \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0133] 对钻柱横截面来说,质心与形心并不完全一致,钻柱旋转时将产生不平衡力(离心力),因此梁单元在x、y、z三个方向上的自转产生的离心力可表示为:

$$f_y = qe\Omega^2 \cos \beta$$

$$[0134] \quad f_z = qe\Omega^2 \sin \beta \quad (22)$$

$$f_x = 0$$

[0135] 式中, $\beta$ 是重心的相位角,rad;同理,离心力矢量的等效节点力可表示为:

$$[0136] \quad F_{imb} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{f_y L}{2} & \frac{f_z L}{2} & 0 & -\frac{f_z L^2}{12} & \frac{f_y L^2}{12} & 0 & \frac{f_y L}{2} & \frac{f_z L}{2} & 0 & \frac{f_z L^2}{12} & -\frac{f_y L^2}{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

[0137] 式中: $f_y = qe\Omega^2 \cos \beta$ , $f_z = qe\Omega^2 \sin \beta$ ,e为钻柱的偏心距,m; $\beta$ 为质心相位角,rad。

[0138] 此外,在钻柱负荷工作的过程中,其振动主要包括横向平移振动和转动,因此每一梁单元的动能包括平移动能和转动动能,因此,每一梁单元的动能的表达式可以为:

$$[0139] \quad T = \frac{1}{2} \int_0^{l_e} \rho A \left[ (\dot{u}_{x0})^2 + (\dot{u}_{y0})^2 + (\dot{u}_{z0})^2 \right] dx + \int_0^{l_e} \rho A e \Omega (\dot{u}_{z0} \cos \Omega t - \dot{u}_{y0} \sin \Omega t) dx + \frac{1}{2} \rho A l_e e^2 \Omega^2 + \frac{1}{2} \int_0^{l_e} \rho \left[ I_x (\dot{\theta}_x^2 + 2\Omega_0 \dot{\theta}_y \theta_z) + I_{yz} (\dot{\theta}_y^2 + \dot{\theta}_z^2) \right] dx \quad (24)$$

[0140] 式中, $\dot{u}_{x0}$ , $\dot{u}_{y0}$ ,和 $\dot{u}_{z0}$ 为节点沿井眼坐标系X、Y、Z轴的平移速度,m/s; $\theta_x$ 表示梁

单元相对其刚体的扭转角,rad; $\theta_y$ 和 $\theta_z$ 分别表示梁单元截面绕y轴和z轴的转角,rad; $\dot{\theta}_x$ 表示钻柱发生扭转振动后的扭转变形速度,rad/s; $\dot{\theta}_y$ 和 $\dot{\theta}_z$ 分别表示梁单元截面绕y轴和z轴的转角速度,rad/s; $e$ 表示单元横截面重心相对于其形心偏心距,m; $\Omega$ 是指井下钻柱的实际转速,rad/s; $\rho$ 是钻柱的密度,kg/m<sup>3</sup>; $l_e$ 是梁单元的长度,m; $A$ 是梁单元的横截面积,m<sup>2</sup>; $I_x$ 是梁单元截面的极惯性矩,m<sup>4</sup>; $I_{yz}$ 是梁单元横截面的惯性矩,m<sup>4</sup>;在式24中,前三项表示梁单元的平移动能,后两项表示梁单元的转动动能。

[0141] 其中,每一梁单元的势能的表达式为:

$$\begin{aligned}
 V = & \frac{EA}{2} \int_0^{l_e} \left( \frac{\partial u_{xo}}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{GI_x}{2} \int_0^{l_e} \left( \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{EI_{yz}}{2} \int_0^{l_e} \left( \frac{\partial \theta_z}{\partial x} \right)^2 dx \\
 & + \frac{EI_{yz}}{2} \int_0^{l_e} \left( \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{EA}{2} \int_0^{l_e} \left( \frac{\partial u_{xo}}{\partial x} \right)^3 dx + \frac{EA}{2} \int_0^{l_e} \frac{\partial u_{xo}}{\partial x} \left[ (\theta_y)^2 + (\theta_z)^2 \right] dx \\
 [0142] \quad & + \frac{3EI_{yz}}{2} \int_0^{l_e} \frac{\partial u_{xo}}{\partial x} \left[ \left( \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta_z}{\partial x} \right)^2 \right] dx + \frac{EI_x}{2} \int_0^{l_e} \frac{\partial u_{xo}}{\partial x} \left( \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)^2 dx \quad (25) \\
 & + \frac{(E-G)I_x}{2} \int_0^{l_e} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \left( \theta_y \frac{\partial \theta_z}{\partial x} - \theta_z \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) dx
 \end{aligned}$$

[0143] 式中, $E$ 是钻柱的弹性模量,Pa; $G$ 是钻柱的剪切模量,Pa。

[0144] 需要说明的是,式(15)中刚度矩阵 $[K]$ 中的线性刚度矩阵 $[K_L]$ 可以通过式(25)的前四项推导出来。与钻柱弯曲变形和轴向变形相对应的非线性刚度矩阵 $[K_{NA1}] + [K_{NA2}]$ 可以通过式(25)的5-9项推导出来;钻柱弯曲变形和扭转变形对应的非线性刚度矩阵 $[K_{NT}]$ 可以通过式(25)的最后三项推导出来,所述线性刚度矩阵 $[K_L]$ 、非线性刚度矩阵 $[K_{NA1}]$ 、 $[K_{NA2}]$ 、非线性刚度矩阵 $[K_{NT}]$ 如图9~12所示。

[0145] 因此,使用形函数将上述式(24)、(25)简化,其格式为:

$$[0146] \quad T = \frac{1}{2} \dot{U}_e M_e \dot{U}_e^T \quad (26)$$

$$[0147] \quad V = \frac{1}{2} \dot{U}_e K_e \dot{U}_e^T \quad (27)$$

[0148] 将式(26)、(27)以矩阵表示,然后再带入式(14),并同时带入式(21)、(23),积分得到随体坐标系下梁单元的非线性横向振动模型。

[0149] 由于上述得到的大地坐标系和随体坐标系的转换关系,可以得到,对于随体坐标系下梁单元的非线性横向振动模型可以转换为在大地坐标系下的梁单元的非线性横向振动模型,其具体转换关系为:

$$\begin{aligned}
 \{U'\}_e &= [Tr] \{U\}_e \\
 \{F'\}_e &= [Tr] \{F\}_e \\
 [0150] \quad [K']_e &= [Tr][K]_e \\
 [M']_e &= [Tr][M]_e \quad (28) \\
 [C']_e &= [Tr][C]_e
 \end{aligned}$$

[0151] 因此,在大地坐标系下的每一梁单元的非线性横向振动模型为:

$$[0152] \quad [M']_e \{\ddot{U}'\}_e + [C']_e \{\dot{U}'\}_e + [K']_e \{U'\}_e = \{F'\}_e \quad (29)$$

[0153] 叠加每一梁单元的的非线性横向振动模型即可得到整个钻柱的动力学模型,其具体为:

$$[0154] \quad [M'] \{\ddot{U}'\} + [C'] \{\dot{U}'\} + [K'] \{U'\} = \{F'\} \quad (30)$$

[0155] 式中,  $\{\ddot{U}'\}$ ,  $\{\dot{U}'\}$ ,  $\{U'\}$  和  $\{F'\}$  分别表示全井钻柱上各节点的广义加速度矩阵、速度矩阵、位移矩阵和外力矩阵;  $[M']$ ,  $[C']$  和  $[K']$  则分别表示全井钻柱的总质量矩阵、总阻尼矩阵和总刚度矩阵。

[0156] 在实际钻井过程中,钻柱的运动受到转盘的约束,因此,钻柱的上端铰接在井眼中心,并承受张力和扭矩。而钻柱下端承受钻压和扭矩,并且其横向位移受到约束。此外,当钻柱径向位移大于钻柱与井眼之间的间隙时,钻柱将受到井眼的约束。因此,所述钻柱边界条件包括井壁约束条件和钻头约束条件,所述井壁约束条件为:

$$[0157] \quad x_i = 0, y_i = 0, z_i = 0, \theta_x = \Omega t, \theta_y = 0, \theta_z = 0;$$

[0158] 其中,  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  分别为钻柱单元绕各坐标轴的转角;  $\Omega$  是指钻柱的转速, rad/s;  $t$  表示时间, s。

[0159] 将钻柱离散为多个单元,只需要考虑节点与井眼之间的接触。因此当钻柱与井眼接触时,钻柱将受到正向力、切向摩擦力和额外的摩擦扭矩。当井筒的弹性形变恢复时,钻柱会反弹回来,而节点又恢复自由,参阅图5。因此,钻柱受到的正向力  $F_N$  可以表示为:

$$[0160] \quad F_N = \begin{cases} -[u_r - (d_o - d_i)/2]k_h - v_r \left( \frac{-\ln(-v_2/v_1)}{\pi} \right) & u_r > (d_o - d_i)/2 \\ 0 & 0 \leq u_r \leq (d_o - d_i)/2 \end{cases} \quad (31)$$

[0161] 式中,  $d_o$  是井筒直径, m;  $d_i$  是钻柱直径, m;  $v_r$  是钻柱的径向速度, m/s;  $u_r$  是钻柱的径向位移, m;  $k_h$  是井筒的刚度, N/m;  $v_1$  和  $v_2$  分别表示节点碰撞前后的速度, m/s。

[0162] 切向摩擦力  $F_f$  和摩擦扭矩  $F_{\text{torq}}$  可以表示为:

$$[0163] \quad F_f = \mu(v_s) F_N, \quad F_{\text{torq}} = \frac{d_o}{2} \mu(v_s) F_N \quad (32)$$

[0164] 式中,  $\mu(v_s)$  是钻柱与井眼之间的摩擦系数,可以通过静态-动力学指数衰减模型计算得到:

$$[0165] \quad \mu(v_s) = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) e^{-d_e v_s} \quad (33)$$

[0166] 式中,  $\mu_k$ ,  $\mu_s$  分别表示动摩擦系数和静摩擦系数;  $d_e$  表示衰减系数;  $v_s$  表示滑移率。

[0167] 钻头本身的特性与钻头和井底岩石的碰撞,钻压  $F_{\text{wob}}$  随着时间  $t$  变化。因此,钻头约束条件为钻压  $F_{\text{wob}}$  随着时间  $t$  的变化,其具体为:

$$[0168] \quad F_{\text{wob}}(t) = W_0 + W_f \sin(\omega_f t) \quad (34)$$

[0169] 式中,  $W_0$  为静态钻压,即上部钻柱施加的钻压值;  $W_f$  为动态钻压值;  $\omega_f$  为钻压波动系数。

[0170] 需要说明的是,钻压波动系数与钻柱的转速和钻头的类型有关:

$$[0171] \quad \omega_f = n_b \Omega$$

[0172] 式中,  $n_b$  为钻头系数,对于PDC钻头  $n_b = 1$ ,对于牙轮钻头  $n_b = 3$ ;  $\Omega$  为钻柱转速。

[0173] 在步骤S4中,为了得到较好的收敛性,所述动力学模型采用广义- $\alpha$ 法离散求解,参阅图6,具体包括以下步骤:

[0174] S41:根据广义- $\alpha$ 法的基本形式得到广义- $\alpha$ 法的计算通式;

[0175] S42:建立质量矩阵[M'],阻尼矩阵[C']和刚度矩阵[K']的空矩阵,并带入广义- $\alpha$ 法的计算通式;

[0176] S43:赋值初始位移 $d_0$ 和初始速度 $v_0$ ,并根据广义- $\alpha$ 法的基本形式获得初始加速度 $a_0$ 值;

[0177] S44:设定时间步长和极限谱半径,计算所需的积分常数;

[0178] S45:计算得到有效刚度矩阵、有效载荷矢量和 $t + \Delta t$ 时刻的位移、时刻 $t + \Delta t$ 的加速度、时刻 $t + \Delta t$ 的速度;

[0179] S46:将S45中获得各值带入所述动力学模型中,并进行迭代计算,求解所述动力学模型。

[0180] 需要说明的是,广义- $\alpha$ 法的基本形式为:

$$d_{n+1} = d_n + v_n \Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta_2 \right) a_n + \beta_2 a_{n+1} \right] \Delta t^2$$

$$[0181] \quad v_{n+1} = v_n + \left[ (1 - \gamma_2) a_n + \gamma_2 a_{n+1} \right] \Delta t \quad (35)$$

$$a_{n+1} = \frac{1}{\beta_2 \Delta t^2} (d_{n+1} - d_n) - \frac{1}{\beta_2 \Delta t} v_n - \left( \frac{1}{2\beta_2} - 1 \right) a_n$$

$$M a_{n+1-\alpha_{m_2}} + C v_{n+1-\alpha_{f_2}} + K d_{n+1-\alpha_{f_2}} = F(t_{n+1-\alpha_{f_2}})$$

$$[0182] \quad \begin{aligned} d_0 &= d \\ v_0 &= v \end{aligned} \quad (36)$$

$$a_0 = M^{-1} (F(0) - C v - K d)$$

$$d_{n+1-\alpha_{f_2}} = (1 - \alpha_{f_2}) d_{n+1} + \alpha_{f_2} d_n$$

$$[0183] \quad v_{n+1-\alpha_{f_2}} = (1 - \alpha_{f_2}) v_{n+1} + \alpha_{f_2} v_n \quad (37)$$

$$a_{n+1-\alpha_{m_2}} = (1 - \alpha_{m_2}) a_{n+1} + \alpha_{m_2} a_n$$

$$t_{n+1-\alpha_{f_2}} = (1 - \alpha_{f_2}) t_{n+1} + \alpha_{f_2} t_n$$

[0184] 式中, $d_n$ 、 $v_n$ 和 $a_n$ 分别表示 $\ddot{U}'$ 、 $\dot{U}'$ 和 $U'$ ,即为钻柱的位移、速度和加速度; $\Delta t$ 表示时间步长,s;下标 $n \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ ;N表示时间步数。

[0185] 其中, $\alpha_{f_2}$ 、 $\alpha_{m_2}$ 、 $\gamma_2$ 和 $\beta_2$ 之间的关系和计算方式如下:

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} - \alpha_{m_2} + \alpha_{f_2}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{4} (1 - \alpha_{m_2} + \alpha_{f_2})^2$$

$$[0186] \quad \alpha_{f_2} = \frac{\rho_{\infty_2}}{\rho_{o_2} + 1} \quad (38)$$

$$\alpha_{m_2} = \frac{2\rho_{\infty_2} - 1}{\rho_{\infty_2} + 1}$$

[0187] 式中, $\rho_{\infty_2}$ 表示极限谱半径, $\rho_{\infty_2} \in [0, 1]$ 。

[0188] 将,式(37)和式(35)带入式(36)获得广义- $\alpha$ 法的计算通式,所述广义- $\alpha$ 法的计算通式具体如下:

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{1-\alpha_{m_2}}{\beta_2 \Delta t^2} M + \frac{(1-\alpha_{f_2})\gamma_2}{\beta_2 \Delta t} C + (1-\alpha_{f_2})K \right] d_{n+1} = (1-\alpha_{f_2})F_{n+1} + \alpha_{f_2}F_n + \\
 [0189] & \left\{ \left[ (1-\alpha_{m_2}) \frac{1}{2\beta_2} - 1 \right] M + (1-\alpha_{f_2}) \left( \frac{\gamma_2}{2\beta_2} - 1 \right) \Delta t C \right\} a_n + \left\{ \frac{1-\alpha_{m_2}}{\beta_2 \Delta t} M + \left[ (1-\alpha_{f_2}) \frac{\gamma_2}{\beta_2} - 1 \right] C \right\} v_n + \quad (39) \\
 & \left[ \frac{1-\alpha_{m_2}}{\beta_2 \Delta t^2} M + \frac{(1-\alpha_{f_2})\gamma_2}{\beta_2 \Delta t} C - \alpha_{f_2} K \right] d_n
 \end{aligned}$$

[0190] 需要说明的是,根据上部边界条件, $d_0$ 和 $v_0$ 赋值为零,并将其带入式(35),即可得到初始情况下的加速度: $a_0$ 。

[0191] 在步骤S44中,积分参数及其具体的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 c_k &= 1 - \alpha_{f_2} \\
 c_0 &= \frac{1 - \alpha_{m_2}}{\beta_2 \Delta t^2} \\
 c_1 &= \frac{c_k \gamma_2}{\beta_2 \Delta t} \\
 c_2 &= \Delta t c_0
 \end{aligned}$$

$$[0192] \quad c_3 = \frac{c_2 \Delta t}{2} - 1 \quad (40)$$

$$c_4 = c_k \frac{\gamma_2}{\beta_2} - 1$$

$$c_5 = c_k \left( \frac{\gamma_2}{2\beta_2} - 1 \right) \Delta t$$

[0193] 而所述钻柱的有效刚度矩阵 $\bar{K}$ 、有效载荷矢量 $\bar{F}_{n+1}$ 的计算式分别为:

$$[0194] \quad \bar{K} = c_0 M + c_1 C + c_k K \quad (41)$$

$$[0195] \quad \bar{F}_{n+1} = (1-\alpha_{f_2})F_{n+1} + \alpha_{f_2}F_n + (c_3 M + c_5 C)a_n + (c_2 M + c_4 C)v_n + (c_0 M + c_1 C - \alpha_{f_2} K)d_n \quad (42)$$

[0196] 因此根据式(17)~(19)、(25)~(27),即可得到钻柱在 $t + \Delta t$ 时刻的位移、加速度和速度:

$$\begin{aligned}
 & d_{n+1} = \bar{K}^{-1} \bar{F}_{n+1} \\
 [0197] & a_{n+1} = \frac{1}{\beta_2 \Delta t^2} (d_{n+1} - d_n) - \frac{1}{\beta_2 \Delta t} v_n - \left( \frac{1}{2\beta_2} - 1 \right) a_n \quad (43) \\
 & v_{n+1} = v_n + (1 - \gamma_2) \Delta t a_n + \gamma_2 \Delta t a_{n+1}
 \end{aligned}$$

[0198] 将式(43)带入式(30)中,并进行迭代求解,得到动力学模型的解。

[0199] 根据上述获得的动力学模型可以比较准确的模拟负载情况下的钻柱的横向振动情况,有利于较为准确的预测钻柱在负载情况下的振动情况及其使用寿命、施工安全。

[0200] 以下以某油田的A1井为例,利用有线钻杆技术和井下工具,获得了A1井的试验数据。测量工具在距钻头30米的位置,测量钻压、钻头扭矩、轴向加速度和侧向加速度,并将其

输送到地面。该井的基本参数如表1所示：

[0201]	钻头直径(mm)	165	井眼长度(m)	4200
	垂直段长度(m)	3600	重力加速度( $m/s^2$ )	9.81
	最大倾斜角	86.2°	水平段长度(m)	150
	钻铤外径(mm)	121	钻铤内径(mm)	57
	钻杆外径(mm)	101	钻杆内径(mm)	82
	加重钻杆外径(mm)	101	加重钻杆内径(mm)	65
	钻铤长度(m)	9	钻杆长度(m)	3384
	加重钻杆长度(m)	307	扶正器长度(m)	2
	扶正器外径(mm)	162.5	钻井液密度( $kg/m^3$ )	1200
	钻杆密度( $kg/m^3$ )	8676	钻铤密度( $kg/m^3$ )	6706
	杨氏模量(GPa)	210	泊松比	0.3
	接箍偏心距(mm)	2	接触点刚度(N/m)	8e6
	接触点阻尼(N.s/m)	1e3	钻压(kN)	40
	钻杆转速(r/min)	60	静摩擦系数	0.2

[0202] 表1

[0203] 根据测量数据,可以获得A1井井眼轨迹,其获得的井眼轨迹如图7所示。

[0204] 需要说明的是,钻柱由一系列带有钻杆、钻铤和加重钻杆(HWDP)组成。如图7所示,对造斜段和水平段的钻柱采用3m的长度来划分梁单元,而垂直段钻柱采用6m的长度来划分梁单元。为了更加准确的得到钻柱动态,将时间 $\Delta t$ 设置为0.001s。

[0205] 将上述数据代入钻柱的动力学模型,模拟得到钻柱在负载时的动态的振动特性,其具体如图8所示。从图8中可以看出,随着静摩擦系数的增大,钻头的横向加速度和扭矩也将增大,当 $u_s=0.05$ (静摩擦系数)和(动摩擦系数) $u_k=0.8u_s$ 时,预测的钻头扭矩(图8b)、钻压(图8a)、横向加速度(图8d)和轴向加速度(图8c)与测量数据基本吻合。钻头与地层存在很强的相互作用,因此,钻压在初始值的 $\pm 100\%$ 内波动,转速围绕1.5KN.m上下波动。而横向加速度远大于轴向加速度,说明横向振动比轴向振动剧烈。这一结论与钻柱的现场数据吻合程度高,证明了本申请公开的动力学模型可以模拟得到较为准确的钻柱负载情况下的振动特性,由于钻柱的横向振动会使底部钻具组合产生较大的高频弯矩波动,从而导致过早疲劳、BHA组件失效、井筒冲蚀和稳定剂磨损等,是钻柱失效的主要原因,因此进行钻柱的横向振动特性的准确预测有利于钻柱负荷过程中各向参数的调控,为钻柱失效预测和为钻井安全施工提供可靠的数据参考。

[0206] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

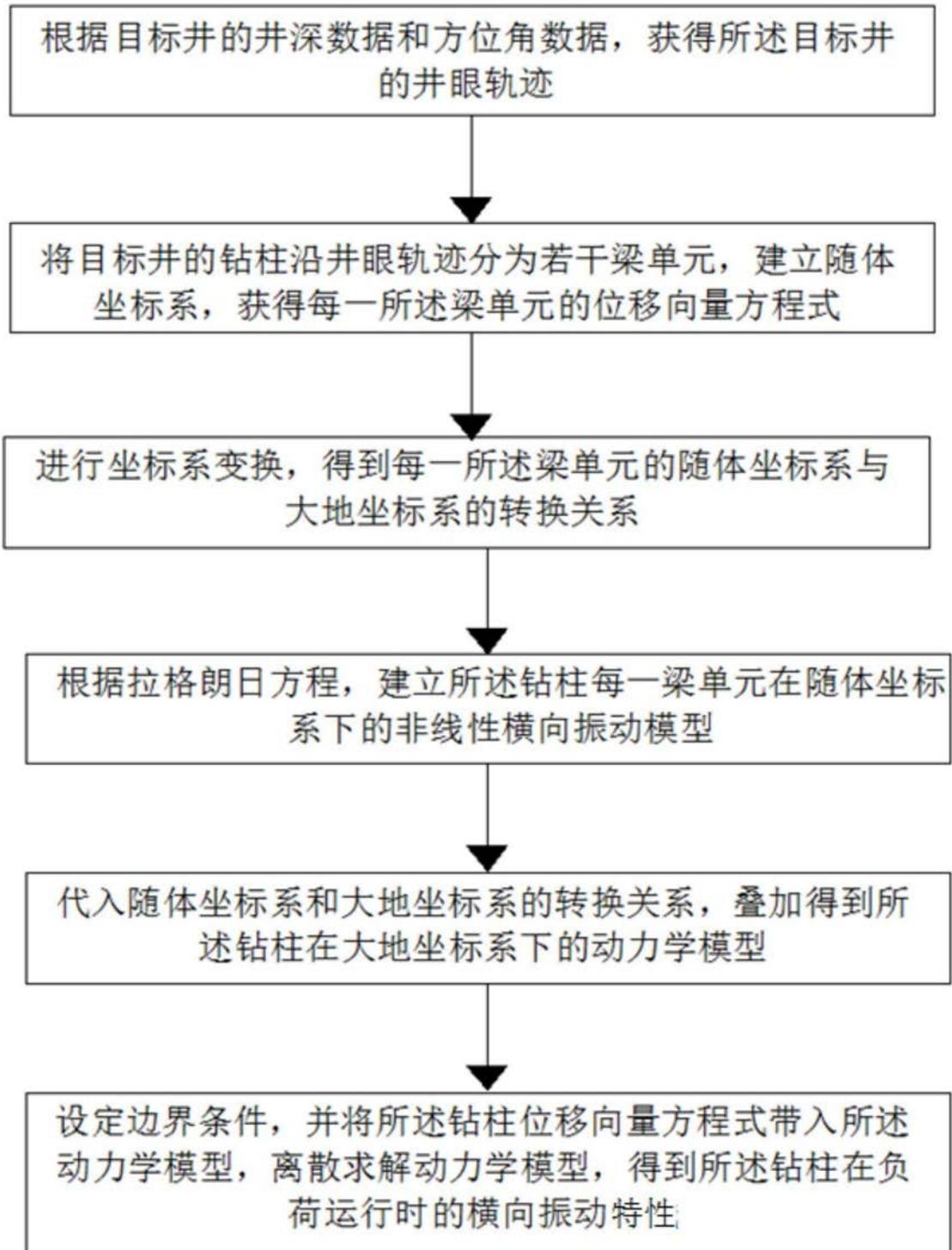


图1

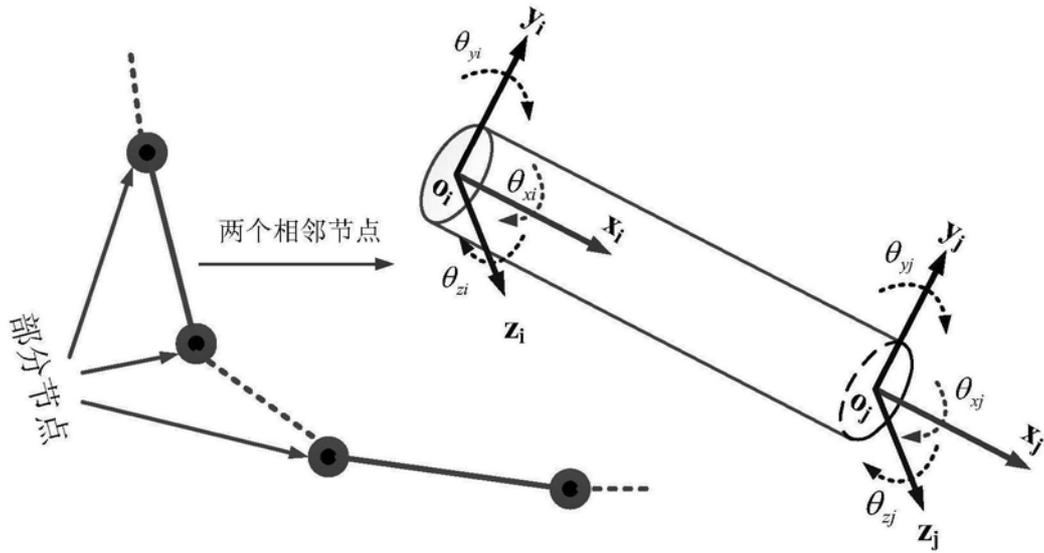


图2

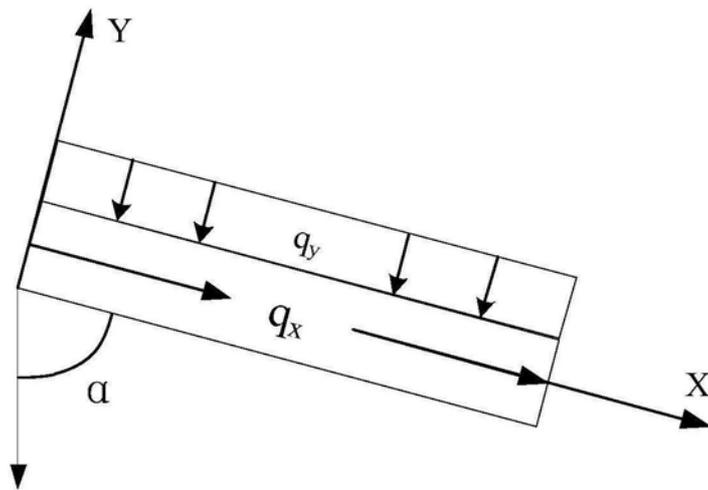


图3

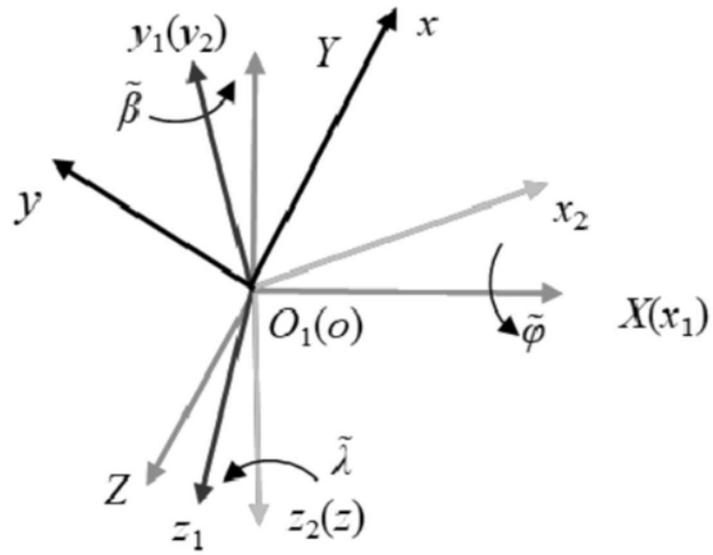


图4

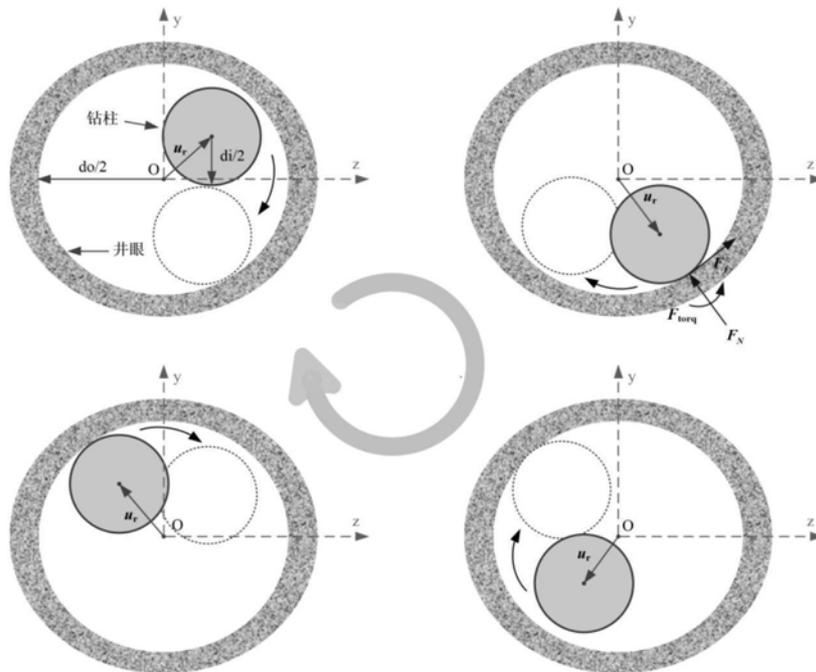


图5

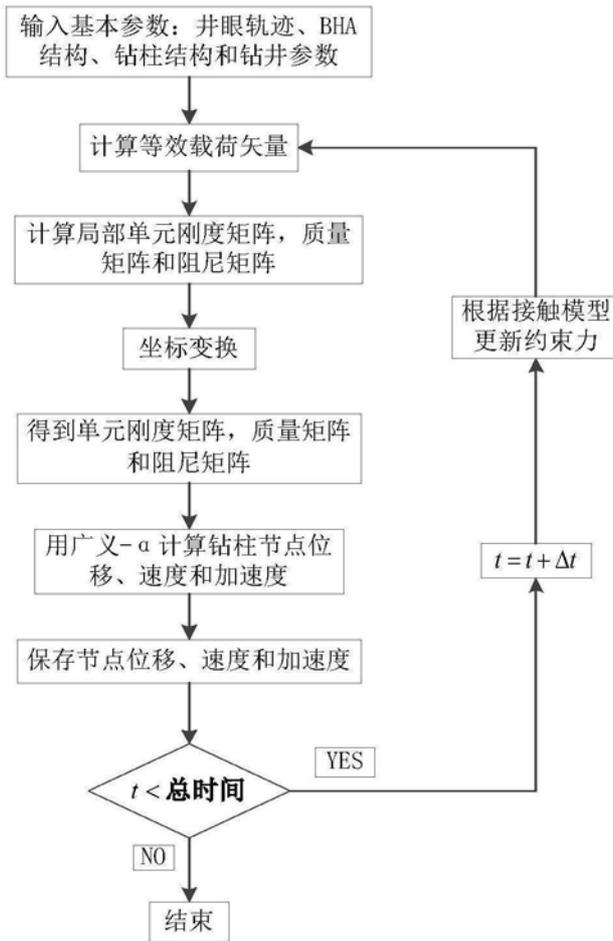


图6

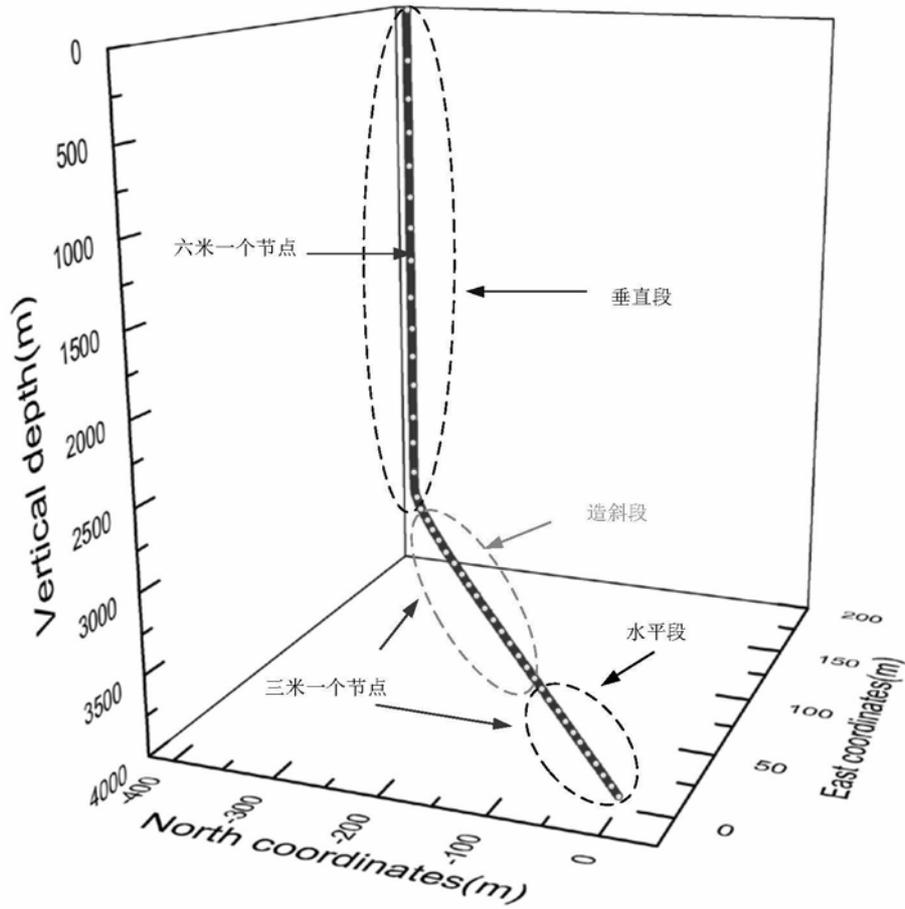
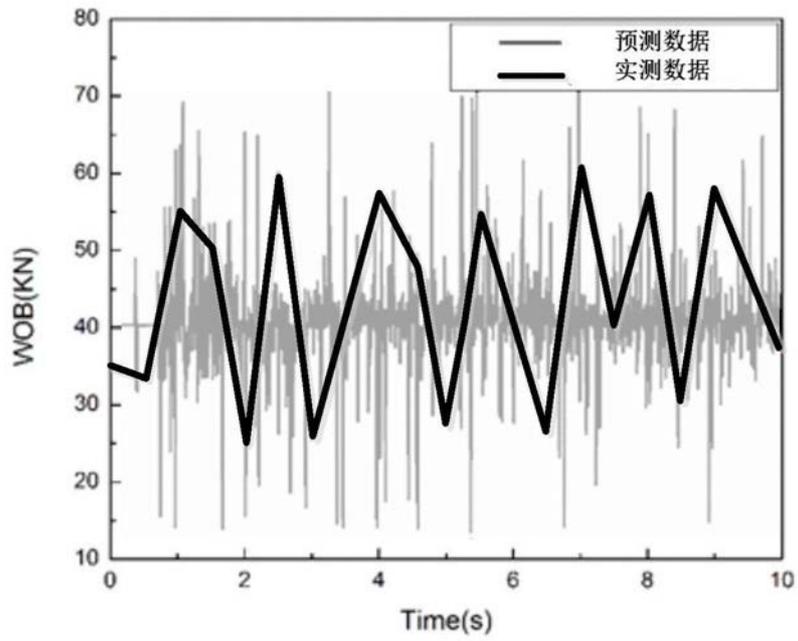
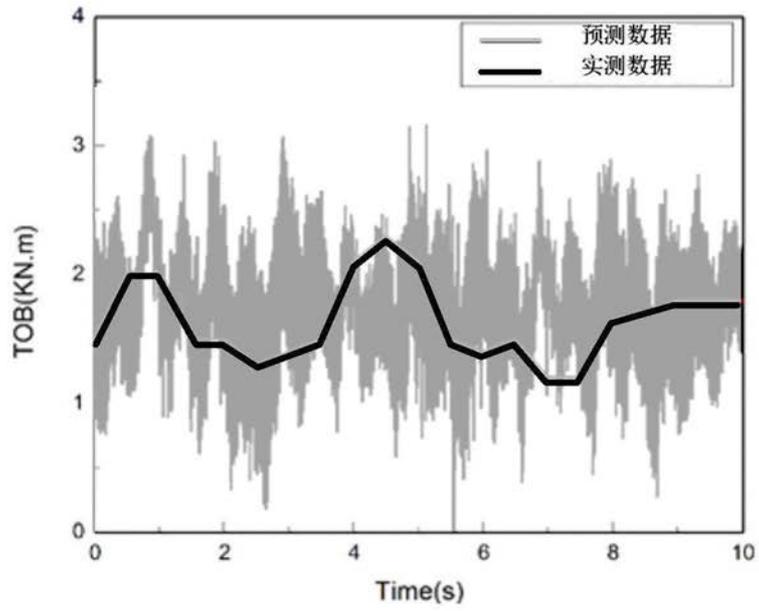


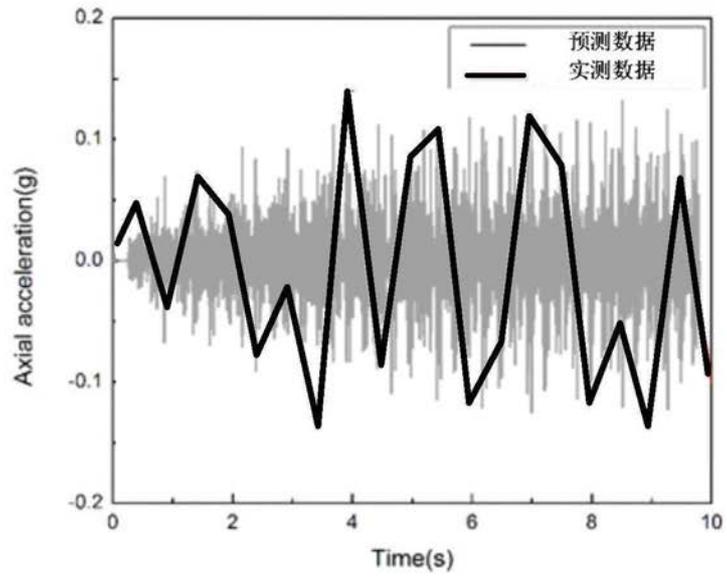
图7



(a)



(b)



(c)





$$[K_{MT}] = (1+2\nu) \frac{GI_x (U_{10} - U_4)}{L^2} \times$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\zeta}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\zeta}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{L}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\zeta}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\zeta}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{2} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{L}{2} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\zeta = \frac{1+\nu}{1+2\nu}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

图12

$$[M_1] = \rho AL \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & \frac{11L}{210} & 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13L}{420} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & -\frac{11L}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & \frac{13L}{420} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{I_x}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_x}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{11L}{210} & 0 & \frac{L^2}{105} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13L}{420} & 0 & -\frac{L^2}{140} & 0 \\ 0 & \frac{11L}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} & 0 & \frac{13L}{420} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{140} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & \frac{13L}{420} & 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & -\frac{11L}{210} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & -\frac{13L}{420} & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & \frac{11L}{210} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{I_x}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_x}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13L}{420} & 0 & -\frac{L^2}{140} & 0 & 0 & 0 & \frac{11L}{210} & 0 & \frac{L^2}{105} & 0 \\ 0 & -\frac{13L}{420} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{140} & 0 & -\frac{11L}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} \end{bmatrix}$$

图13

$$[M_2] = \frac{\rho I_{yz}}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} \\ 0 & 0 & \frac{6}{5} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6}{5} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{2L^2}{15} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{L^2}{30} & 0 \\ 0 & \frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{2L^2}{15} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{10} \\ 0 & 0 & -\frac{6}{5} & 0 & \frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{6}{5} & 0 & \frac{L}{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & -\frac{L^2}{30} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} & 0 & \frac{2L^2}{15} & 0 \\ 0 & \frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{30} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix}$$

图14

$$[\mathbf{C}_N] = \frac{\Omega J_x}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6}{5} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6}{5} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{2L^2}{15} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{30} \\ 0 & 0 & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{2L^2}{15} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{L^2}{30} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6}{5} & 0 & \frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{6}{5} & 0 & \frac{L}{10} & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{30} & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{2L^2}{15} \\ 0 & 0 & \frac{L}{10} & 0 & \frac{L^2}{30} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{10} & 0 & -\frac{2L^2}{15} & 0 \end{bmatrix}$$

图15