



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105283629 B

(45)授权公告日 2018.03.09

(21)申请号 201380077367.7

(22)申请日 2013.08.30

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105283629 A

(43)申请公布日 2016.01.27

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.12.11

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2013/057689 2013.08.30

(87)PCT国际申请的公布数据
W02015/030820 EN 2015.03.05

(73)专利权人 哈里伯顿能源服务公司
地址 美国得克萨斯州

(72)发明人 J·D·戴克斯特拉 Z·孙

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

代理人 张欣

(51)Int.Cl.

E21B 19/22(2006.01)

E21B 7/08(2006.01)

E21B 19/18(2006.01)

(56)对比文件

CN 1798903 A, 2006.07.05,

CN 101512098 A, 2009.08.19,

CN 101466911 A, 2009.06.24,

US 2004118612 A1, 2004.06.24,

US 2006162962 A1, 2006.07.27,

US 6446737 B1, 2002.09.10,

US 2009065258 A1, 2009.03.12,

审查员 卢岩

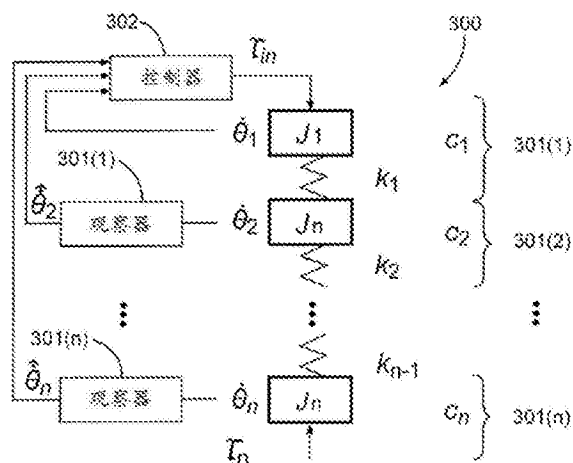
权利要求书3页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

钻柱在定向钻井的滑动模式期间的优化的
旋转

(57)摘要

本文公开一种用于优化钻柱的旋转的示例方法,所述钻柱耦合至钻头并且安置在钻孔内,所述方法可包括确定所述钻柱的至少一部分的角速度。还可确定角速度阈值以避免静摩擦。此外,还可确定施加至所述钻柱以使所述角速度维持处于或高于所述角速度阈值的最小输入扭矩。所述方法可进一步包括至少部分地基于所述最小输入扭矩来产生针对顶部驱动电机的控制信号。



1. 一种用于控制耦合至钻孔内的钻头的钻柱的旋转的方法,所述方法包括:
 确定所述钻柱的至少一部分的角速度;
 确定角速度阈值以避免静摩擦;
 确定施加至所述钻柱以使所述角速度维持处于或高于所述角速度阈值的最小输入扭矩;以及

至少部分地基于所述最小输入扭矩产生针对顶部驱动电机的控制信号,从而在第一方向和第二方向上交替地施加优化的扭矩,以在不旋转钻头的情况下连续地旋转钻柱。

2. 如权利要求1所述的方法,其中确定所述钻柱的所述部分的所述角速度包括以下各项之一:从所述钻孔内接收角速度测量值;以及使用所述钻柱的数学模型来估计所述角速度。

3. 如权利要求2所述的方法,其中
 确定所述钻柱的至少一部分的所述角速度包括确定所述钻柱的邻近所述钻头的第一段的所述角速度;以及

所述第一段为集中质量模型的多个段的对应于所述钻柱的一个。

4. 如权利要求3所述的方法,其中确定所述最小输入扭矩包括通过代价函数来利用模型预测控制方案。

5. 如权利要求3所述的方法,其中确定所述最小输入扭矩包括通过以下代价函数来利用模型预测控制方案:

$$\min_{\tau_{in}} \int_0^T \left[W_1 \cdot I_{n,s}(t) + W_2 \cdot \left(\frac{d\tau_{in}}{dt} \right)^2 \right] dt$$

其中 $I_{n,s}(t)$ 对应于给定时间 t 时所述第一段的静摩擦状态; 0 至 T 表示用于计算的时间范围; $d\tau_{in}/dt$ 对应于输入扭矩的变化率; 并且 W_1 和 W_2 分别为对所述第一段上的静摩擦和非平滑扭矩信号进行妨碍的加权因子。

6. 如权利要求5所述的方法,其中所述代价函数遵循以下模型方程:

$$(M1) J_i \ddot{\theta}_i - k_{i-1} (\theta_i - \theta_{i-1}) + k_i (\theta_{i+1} - \theta_i) - c_i \dot{\theta}_i = 0$$

$$(M2) c_i = c_{i,s} * I_{i,s} + c_{i,k} * I_{i,k} \text{ 且 } I_{i,s} + I_{i,k} = 1$$

$$(M3) I_{i,k} * \theta_{safe}^* \leq \theta_i^*$$

$$(M4) I_{i,s}, I_{i,k} = 0 \text{ 或 } 1;$$

以及以下约束方程:

$$(C1) \tau^{\min} \leq \tau_{in} \leq \tau^{\max}$$

$$(C2)$$

$$\int_0^T \theta_s^* dt = 0$$

其中 θ_i 对应于所述集中质量模型的段的角取向; $\dot{\theta}_i$ 对应于所述集中质量模型的段的角速度; $\ddot{\theta}_i$ 对应于所述集中质量模型的段的角加速度; J_i 对应于所述集中质量模型的段的惯性; c_i 对应于所述集中质量模型的段的摩擦系数; $c_{i,s}$ 对应于所述集中质量模型的段的静摩擦系数; $c_{i,k}$ 对应于所述集中质量模型的段的动摩擦系数; k_i 对应于所述集中质量模型的段

的弹性系数； $I_{i,s}$ 包括所述集中质量模型的段的静摩擦状态； $I_{i,k}$ 包括所述集中质量模型的段的动摩擦状态； θ^*_{safe} 对应于所述角速度阈值； τ^{min} 对应于耦合到所述钻柱的顶部驱动器的最小扭矩值；以及 τ^{max} 包括所述顶部驱动器的最大扭矩值。

7. 如权利要求2所述的方法，其中确定所述最小输入扭矩包括接收与所述钻柱的操作状态相对应的至少一个反馈信号。

8. 如权利要求2所述的方法，其中确定所述最小输入扭矩包括求解以下代价函数：

$$J = \int \left[W_1 (\theta^*_{bot} - \theta^*_{top})^2 + (W_2 * \theta^*_{top}) + W_3 \left(\frac{d\tau_{in}}{dt} \right)^2 \right] dt$$

其中 θ^*_{bot} 包括所述钻柱的所述部分的测量角速度或估计角速度之一； θ^*_{top} 包括所述钻柱的所述顶部处的角速度； θ^*_{safe} 包括所述角速度阈值； $d\tau_{in}/dt$ 对应于输入扭矩的变化率；并且 W_1 、 W_2 和 W_3 包括加权因子。

9. 如权利要求8所述的方法，其中产生所述控制信号包括接收至少部分地基于所述代价函数的输入扭矩参数。

10. 如权利要求8所述的方法，其中确定所述最小输入扭矩包括改变所述加权因子中的至少一者。

11. 一种用于旋转耦合至钻孔内的钻头的钻柱的设备，所述设备包括：

处理器；以及

耦合至所述处理器的存储器装置，其中所述存储器装置包括指令集，所述指令集在由所述处理器执行时，使所述处理器

确定所述钻柱的至少一部分的角速度；

确定角速度阈值以避免静摩擦；

确定施加至所述钻柱以使所述角速度维持处于或高于所述角速度阈值的最小输入扭矩；以及

至少部分地基于所述最小输入扭矩产生针对顶部驱动电机的控制信号，从而在第一方向和第二方向上交替地施加优化的扭矩，以在不旋转钻头的情况下连续地旋转钻柱。

12. 如权利要求11所述的设备，其中使所述处理器确定所述钻柱的所述部分的所述角速度的所述指令集进一步使所述处理器执行以下各项之一：从所述钻孔内接收角速度测量值；以及使用所述钻柱的数学模型来估计所述角速度。

13. 如权利要求12所述的设备，其中

所述钻柱的所述至少一部分包括所述钻柱的邻近所述钻头的第一段；以及

所述第一段为集中质量模型的多个段的对应于所述钻柱的一个。

14. 如权利要求13所述的设备，其中使所述处理器确定所述最小输入扭矩的所述指令集进一步使所述处理器通过代价函数来利用模型预测控制方案。

15. 如权利要求14所述的设备，其中所述代价函数包括：

$$\min_{\tau_{in}} \int_0^T \left[W_1 \cdot I_{n,s}(t) + W_2 \cdot \left(\frac{d\tau_{in}}{dt} \right)^2 \right] dt$$

其中 $I_{n,s}(t)$ 对应于给定时间 t 时所述第一段静摩擦状态； 0 至 T 表示用于计算的时间范围； $d\tau_{in}/dt$ 对应于输入扭矩的变化率；并且 W_1 和 W_2 分别为对所述第一段上的静摩擦和非

平滑扭矩信号进行妨碍的加权因子。

16. 如权利要求15所述的设备,其中所述代价函数遵循以下模型方程:

$$(M1) J_i \ddot{\theta}_i - k_{i-1} (\theta_i - \theta_{i-1}) + k_i (\theta_{i+1} - \theta_i) - c_i J_i = 0$$

$$(M2) c_i = c_{i,s} * I_{i,s} + c_{i,k} * I_{i,k} \text{ 且 } I_{i,s} + I_{i,k} = 1$$

$$(M3) I_{i,k} * \dot{\theta}_{safe} \leq \dot{\theta}_i$$

$$(M4) I_{i,s}, I_{i,k} = 0 \text{ 或 } 1;$$

以及以下约束方程:

$$(C1) \tau^{\min} \leq \tau_{in} \leq \tau^{\max}$$

$$(C2)$$

$$\int_{\theta}^{\dot{\theta}} \dot{\theta}_i dt = 0$$

其中 θ_i 对应于所述集中质量模型的段的角取向; $\dot{\theta}_i$ 对应于所述集中质量模型的段的角速度; $\ddot{\theta}_i$ 对应于所述集中质量模型的段的角加速度; J_i 对应于所述集中质量模型的段的惯性; c_i 对应于所述集中质量模型的段的摩擦系数; $c_{i,s}$ 对应于所述集中质量模型的段的静摩擦系数; $c_{i,k}$ 对应于所述集中质量模型的段的动摩擦系数; k_i 对应于所述集中质量模型的段的弹性系数; $I_{i,s}$ 包括所述集中质量模型的段的静摩擦状态; $I_{i,k}$ 包括所述集中质量模型的段的动摩擦状态; $\dot{\theta}_{safe}$ 对应于所述角速度阈值; $\tau^{\min}$ 对应于耦合到所述钻柱的顶部驱动器的最小扭矩值;以及 $\tau^{\max}$ 包括所述顶部驱动器的最大扭矩值。

17. 如权利要求12所述的设备,其中使所述处理器确定所述最小输入扭矩的所述指令集进一步使所述处理器接收与所述钻柱的操作状态相对应的至少一个反馈信号。

18. 如权利要求12所述的设备,其中使所述处理器确定所述最小输入扭矩的所述指令集进一步使所述处理器求解以下代价函数:

$$J = \int \left[W_1 (\dot{\theta}_{top} - \dot{\theta}_{bot})^2 + (W_2 * \dot{\theta}_{top}) + W_3 \left(\frac{d\tau_{in}}{dt} \right)^2 \right] dt$$

其中 $\dot{\theta}_{bot}$ 包括所述钻柱的所述部分的测量角速度或估计角速度之一; $\dot{\theta}_{top}$ 包括所述钻柱的所述顶部处的角速度; $\dot{\theta}_{safe}$ 包括所述角速度阈值; $d\tau_{in}/dt$ 对应于输入扭矩的变化率;并且 W_1 、 W_2 和 W_3 包括加权因子。

19. 如权利要求18所述的设备,其中使所述处理器产生所述控制信号的所述指令集进一步使所述处理器确定至少部分地基于所述代价函数的输入扭矩。

20. 如权利要求18所述的设备,其中使所述处理器确定所述最小输入扭矩的所述指令集进一步使所述处理器改变所述加权因子中的至少一个。

钻柱在定向钻井的滑动模式期间的优化的旋转

[0001] 背景

[0002] 本公开大体涉及钻井操作,并且更具体地,涉及钻柱在定向钻井操作的滑动模式期间的优化的旋转。

[0003] 一般来说,钻柱可从地面开始旋转以使钻头在钻井期间旋转。在某些定向钻井应用中,使用具有弯外壳的井下泥浆电机来旋转钻头,同时暂停从地面对钻柱施加任何旋转。当泥浆电机用于旋转钻头,并且当钻头的穿透速度相对低的时候,钻柱的一部分可变成静止的并且导致形成静摩擦。可通过按压钻柱直到所存储的能量大于静摩擦力来破坏静摩擦。当所存储的能量被释放时,将使所述能量传递至钻头,这可能会损害钻头。在某些现有操作中,可使钻柱部分地旋转以防止钻柱变成静止的。然而,用于控制钻柱的部分旋转的现有机构能量效率低下。

[0004] 附图

[0005] 通过部分参照以下描述和附图,可以理解本公开的一些具体示例性实施方案。

[0006] 图1是图示了根据本公开各方面的示例定向钻井系统的图。

[0007] 图2是图示了根据本公开各方面的示例信息处理系统的图。

[0008] 图3A和3B是图示了根据本公开各方面的示例定向钻井系统模型的图。

[0009] 图4A和4B是图示了根据本公开各方面的优化的转矩输入和控制信号的图。

[0010] 图5是图示了根据本公开各方面的示例控制系统的图。

[0011] 图6是图示了根据本公开各方面的示例控制系统的图。

[0012] 虽然已参照本公开的示例性实施方案来绘示、描述及界定本公开的实施方案,但这种参照并不暗示对本发明的限制,且不应推断出存在此种限制。所公开的主题能够在形式和功能上作出相当多的修改、更改及等效物,如相关领域的和受益于本公开的技术人员将想到的。本公开的所绘示及所描述的实施方案仅为示例,且并本公开中已描绘和描述的实施方案仅仅是实施例,而且并未详尽说明本发明的范围。非穷举本公开的范围。

[0013] 详述

[0014] 本公开大体涉及钻井操作,并且更具体地,涉及钻柱在定向钻井操作的滑动模式期间的优化的旋转。

[0015] 本公开的说明性实施方案在本文中详细描述。为了清楚起见,在本说明书中可能并不描述实际实现方式的全部特征。当然应当理解,在任何此类实际实施方案的发展中,必须做出许多与实现方式相关的决定以实现特定实现方式目标,这些目标因实现方式的不同而不同。此外,还应当理解,这样的开发工作可能是复杂而耗时的,但是对于受益于本公开的本领域技术人员而言,却是进行设计的常规任务。

[0016] 为了便于更好地理解本公开,给出了某些实施方案的下列实施例。下列实施例决不限或界定本公开的范围。本公开的实施方案可应用于任何类型的地层中的水平井眼、垂直井眼、倾斜井眼、分支井眼、u形管连接件、交会处、旁路(在中间深度的被卡落物周围钻探并且回到下面的井中)或相反非线性的井眼。实施方案可应用于注入井和生产井,包括自然资源生产井诸如硫化氢、碳氢化合物或地热井;以及用于跨河隧道的钻孔构造和其他此

类用于近地面构造目的的隧道钻孔或用于输送流体诸如碳氢化合物的钻孔u形管道。以下相对于一种实现方式所述的实施方案并非旨在进行限制。

[0017] 现代石油钻井和生产操作需要与井下参数和情况有关的信息。存在几种方法进行井下信息收集,包括随钻测井(“LWD”)和随钻测量(“MWD”)。在LWD中,通常在钻井过程中收集数据,从而避免移除钻井组件以插入电缆测井工具的需要。因此,LWD允许钻探机进行准确的实时修正或校正,以优化性能同时使停机时间最小化。MWD是用于在钻井继续时用于测量与钻井组件的移动和位置有关的井下情况的术语。LWD更多地集中于岩层参数测量。虽然MWD与LWD之间可能存在区别,但术语MWD和LWD通常互换使用。为了本公开的目的,使用了术语LWD,但应理解,此术语包括岩层参数的收集和关于钻井组件的移动和位置的信息收集。

[0018] 如本文所用的术语“耦合”旨在表示间接连接或直接连接。因此,如果第一装置耦合至第二装置,那么所述连接可以通过直接连接来实现或通过间接机械或电连接经由其他装置和连接件来实现。类似地,如本文所使用的术语“通信地耦合”旨在表示直接或间接的通信连接。这种连接可以是有线的也可以是无线的连接诸如以太网或LAN。这种有线的和无线的连接是本领域技术人员熟知的且因此不在本文详细论述。因此,如果第一装置通信地耦合至第二装置,那么所述连接可以通过直接连接来实现或通过间接连接经由其他装置和连接件来实现。不定冠词“一”或“一个”在本文中定义成表示所介绍元件中的一个或超过一个。

[0019] 图1是图示了根据本公开各方面的示例定向钻井系统100的图。如本文所使用,定向钻井系统可以是其中钻头的倾斜度或方位角取向中的至少一者故意偏离以接触、穿透或与目标相交的地下钻井系统。例如,定向钻井系统可用于穿透地下储层以生产碳氢化合物。定向钻井系统还可用于遵循岩层内的现有钻孔或与已井喷的现有井相交。

[0020] 在所示实施方案中,定向钻井系统100包括定位在岩层103上方在地面102处的钻塔101。虽然钻塔101在图1中示为位于陆地上,但钻塔101也可用于海面上,其中地面102包括钻井平台。钻塔101可耦合至钻井组件104,该钻井组件在岩层103内钻出钻孔105。钻井组件104可包括钻柱106、井底组件(BHA) 107和弯接头108。钻柱106可包括多个管状物,这些管状物通过螺纹连接件耦合在一起。BHA 107可包括一个或多个LWD或MWD系统109、遥测系统110、泥浆电机111和钻头112。弯接头108可包括具有固定角度或可变角度的接合点,所述角度大体控制钻井组件104尤其是钻头112的倾斜度和方位角取向中的至少一者。在某些实施方案中,可使弯接头108结合到BHA 107中或沿钻柱106定位在不同的位置。在某些实施方案中,定向钻井系统100可包括泥浆电机,其包括弯外壳而不是图1所示的单独的弯接头108。

[0021] LWD/MWD系统109可包括井下测量或测井仪器,包括磁力计、加速计、天线等。遥测系统110可在LWD/MWD系统109及其它井下系统与地面控制单元113之间提供通信路径。例如,遥测系统110可包括泥浆脉冲发生器,该泥浆脉冲发生器通过钻孔105中的钻井泥浆内的压力脉冲系列与地面控制单元113通信。

[0022] 在所示实施方案中,地面控制单元113可包括信息处理系统。如本文所使用,信息处理系统可包括为了企业、科学、控制或其他目的而可操作用来计算、分类、处理、传输、接收、检索、创立、切换、存储、显示、表现、检测、记录、再生、操作或利用任何形式的信息、情报或数据的任一工具或工具的集合。例如,信息处理系统可以是个人计算机、网络存储装置或任何其他适合的装置并且可以在尺寸、形状、性能、功能及价格上进行改变。信息处理系统

可包括随机存取存储器 (RAM)、一个或多个处理资源诸如中央处理单元 (CPU) 或者硬件或软件控制逻辑、只读存储器 (ROM) 和/或其他类型的非易失性存储器。信息处理系统的附加组件可包括一个或多个盘驱动器、用于与外部装置通信的一个或多个网络端口以及各种输入和输出 (I/O) 装置诸如键盘、鼠标和视频显示器。信息处理系统还可包括可操作用来在各种硬件组件之间传输通信的一个或多个总线。

[0023] 在钻井操作期间,可将钻井泥浆从储层114通过管道115泵抽到钻井组件104的钻孔120中。一旦引入到钻井组件104的钻孔120中,钻井泥浆可如箭头117所示远离地面流动。钻井泥浆可通过钻头112内的流体端口离开钻井组件104。当钻井泥浆离开钻头112时,钻井泥浆可以润滑和冷却钻头112的切削面并将切削物从钻头112带到地面102上。钻井泥浆115可如箭头118所示在钻井组件104与钻孔105的壁之间的环形区域119内流至地面102。

[0024] 泥浆电机111可在钻井流体117流动范围内包括至少一个元件,该元件将钻井流体117流动的能量转换成旋转运动。例如,泥浆电机111可包括响应于流体流动而旋转的涡轮机。该涡轮机可驱动输出轴,该输出轴可直接或通过齿轮组件及其他驱动元件间接耦合至钻头112。因此,在将钻井泥浆泵抽到钻井组件104中时,钻头112可旋转并且切入岩层103中。值得注意的是,在钻出钻孔105时,通过利用泥浆电机111旋转钻头112而非旋转钻柱106,弯接头108和钻头112的方位角取向可保持基本恒定。然而,当钻井组件104的穿透速度较低时,钻柱106的一部分可变成静止的,导致在钻柱106与钻孔105的壁之间形成静摩擦。必须克服这个静摩擦,然后才能继续钻井。

[0025] 根据本公开各方面,一般可通过连续旋转钻柱106来避免或减少静摩擦。在某些实施方案中,可使输入扭矩最优化以使得该输入扭矩为使钻柱106在不造成钻头112旋转(这会改变钻头的方位角取向)的情况下连续旋转所需的最小输入扭矩。可以在第一方向和第二方向上交替地施加优化的扭矩/旋转,以实现钻头不旋转情况下的基本连续旋转。在某些实施方案中,可通过耦合至钻柱106的顶部驱动器116向钻柱106施加最小输入扭矩。顶部驱动器116可耦合至地面控制单元113并且可包括电机,该电机至少部分地基于由地面控制单元113生成的命令信号来向钻柱106施加扭矩。例如,顶部驱动器116可包括控制器,该控制器从地面控制单元113接收命令信号并且导致顶部驱动器116内的电机向钻柱106施加一定扭矩。在其他实施方案中,来自地面控制单元113的命令信号可直接控制电机。在其他实施方案中,可在结合在顶部驱动器106内的信息处理系统处生成命令信号。

[0026] 如上所述,地面控制单元113可包括处理器和至少一个存储器装置。该至少一个存储器装置可包括指令集,所述指令集在由处理器执行时,使处理器确定钻柱106的至少一部分的角速度、确定角速度阈值以避免静摩擦、确定用于施加到钻柱以使角速度维持处于或高于角速度阈值的最小输入扭矩并且至少部分地基于最小输入扭矩产生针对顶部驱动器电机的控制信号。该最小输入扭矩可对应于意欲在消耗最小能量的情况下基本避免钻柱上的静摩擦的最小输入扭矩。在某些实施方案中,地面控制单元113还可从井下传感器接收关于某些实时井下情况的测量值诸如角速度,这些测量值可用作对最小输入扭矩测定的反馈,如将在以下所述。在某些实施方案中,地面控制单元113还可使用钻柱106的数学模型而非实际测量值来计算或确定某些值诸如角速度。在某些实施方案中,地面控制单元113可包括多个信息处理系统,该多个信息处理系统协作以执行上述功能。

[0027] 图2是图示了根据本公开各方面的示例信息处理系统200的图。信息处理系统200

的处理器或CPU 201通信地耦合至存储器控制器集线器或北桥202。存储器控制器集线器202可包括存储器控制器,该存储器控制器用于将信息引导至信息处理系统200内的各种系统存储器组件诸如RAM 203、存储元件206和硬盘驱动器207或从其中引导出来。存储器控制器集线器202可耦合至RAM 203和图形处理单元204。存储器控制器集线器202还可耦合至I/O控制器集线器或南桥205。I/O集线器205耦合至信息处理系统200的存储元件(包括存储元件206),该存储元件可包括快闪ROM,该快闪ROM包括计算机系统的基本输入/输出系统(BIOS)。I/O集线器205还耦合至信息处理系统200的硬盘驱动器207。I/O集线器205还可耦合至超级I/O芯片208,该超级I/O芯片本身耦合至计算机系统的几个I/O端口,包括键盘209和鼠标210。在某些实施方案中,超级I/O芯片208可用于将命令信号传输至顶部驱动器,类似于图1中的顶部驱动器116。

[0028] 根据本公开各方面,信息处理系统可使用至少一个代价函数来确定使钻柱在钻头不旋转情况下连续旋转所需的最小扭矩力。如下所述,该至少一个代价函数可结合定向钻井系统的数学模型一起使用或可在无定向钻井系统的数学模型的情况下与系统反馈一起使用。

[0029] 图3A和3B是图示了可用于确定最小输入扭矩的定向钻井系统的示例数学模型的图。在某些实施方案中,该模型可包括集中质量模型,其中钻井组件被分成多个段,这些段被单独建模为单质量弹簧系统。图3A是图示了已细分为多个段301(1)-(n)的示例定向钻井系统的图。可将段301(1)-(n)中的每一个都建模为单质量弹簧系统,其中这些段301(1)-(n)中的每一个均对应于不同的惯性J、摩擦系数c和弹性系数k。模型300的最后一个段301(n)可包括位于钻头和弯接头正上方的段。如下所述,可使扭矩最优化以使得段301(n)的角速度如此以致能够避免静摩擦,而无需向钻头传输扭矩,钻头需要保持方位角固定。

[0030] 图3B图示了包括单质量弹簧系统的示例集中质量模型350的图,这些单质量弹簧系统对应于段301(1)-(n)中的每一个。段301(1)-(n)中的每一个均可串联连接。如可以看出,可将扭矩 τ_{in} 从控制器302施加至第一段301(1)。控制器302可与图1中的地面控制单元113类似,并且还可包括顶部驱动器内的控制器。段301(1)-(n)中的每一个均可具有对应的角取向 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 。每一段的动力学性质可使用以下方程式来表征:

$$[0031] \quad J_i \ddot{\theta}_i - k_{i-1}(\theta_i - \theta_{i-1}) + k_i(\theta_{i+1} - \theta_i) - c_i * m_i * r * \cos \phi_i + \tau_{ext} = 0$$

[0032] 其中 $\theta_0 = \theta_1$ 并且 $\theta_{n+1} = \theta_n$; τ_{ext} 是通过顶部驱动器施加在地面上的扭矩($i=1$)或岩石在钻头上的反扭矩($i=n$); m_i 是段i的质量;并且r是钻柱的半径。每一段的摩擦系数 c_i 可表示如下:

$$[0033] \quad c_i = c_{i,s} \text{ 当 } \dot{\theta}_i = 0 \text{ 时}, c_{i,k} \text{ 当 } \dot{\theta}_i > 0 \text{ 时}$$

[0034] 其中当段的角速度 $\dot{\theta}_i$ 为零时, $c_{i,s}$ 对应于静摩擦系数;并且当段的角速度 $\dot{\theta}_i$ 大于等于零时, $c_{i,k}$ 对应于动摩擦系数。

[0035] 输入扭矩 τ_{in} 可使段301(1)-(n)中的一些或全部以特定角速度 $\dot{\theta}$ 旋转。例如,段301(2)可以角速度 $\dot{\theta}_2$ 旋转。在某些实施方案中,可使位于第一段下方的每一段耦合至传感器组件或观察器303(1)-(n),这将产生对应角速度 $\dot{\theta}_i$ 的估计值 $\theta_{e,i}$ 。可根据施加输入扭矩 τ_{in} 的顶部驱动器的速度直接确定第一段301(1)的角速度 $\dot{\theta}_1$,并且因此不需要传感器组件或观察器。

[0036] 根据本公开的某些方面,以上方程式可用于对钻井组件建模,并且所述模型可通

过信息处理系统结合代价函数使用,以确定或计算最小输入扭矩并且生成使避免钻柱上静摩擦所需的能量最小化的对应控制信号。所述代价函数可对应于模型预测控制方案,该模型预测控制方案可在耦合至顶部驱动器的控制器或处理器内执行。在复杂系统中,模型预测控制方案可预测建模系统的由于自变量变化而导致的因变量变化。自变量通常是可由控制器调节的变量。因变量包括表示控制目标或过程约束的测量值。如下所述,模型预测控制方案可使用当前测量值、系统的当前动态状态、系统模型和极限,以计算因变量的未来变化。计算这些变化以使因变量保持接近目标诸如最小能量值,同时遵从对自变量和因变量二者的约束。模型预测控制方案可仅仅发送出每个自变量将实现的第一变化,并且当需要下一次变化时,重复计算。

[0037] 示例代价函数可包括以下方程式 (CF1) :

$$[0038] \quad \min \int_0^T \left[W_1 \cdot I_{n,s}(t) + W_2 \cdot \left(\frac{d\tau_{in}}{dt} \right)^2 \right] dt$$

[0039] 其中 $I_{n,s}(t)$ 对应于在给定时间 t 时位于钻头正上方的段的静摩擦状态; 0 至 T 表示计算的时间范围; $d\tau_{in}/dt$ 对应于输入扭矩信号的变化率; 并且 W_1 和 W_2 是对钻头上方的段缺乏移动进行妨碍的加权因子 (W_1) 和对非平滑扭矩信号进行妨碍的加权因子 (W_2)。当钻柱从动摩擦过渡到静摩擦时,在地面上所测量的扭矩将会变化, $d\tau_{in}/dt$ 可用于抑制扭矩不必要的变化。此外,如果段正在移动,那么段的静摩擦状态变量值 $I_{i,s}$ 可为零,并且如果段未移动,那么段的静摩擦状态变量值可为一,并且可形成静摩擦。

[0040] 代价函数 CF1 可遵循钻井组件模型,如下模型方程所表示:

$$[0041] \quad (M1) \quad J_i \ddot{\theta}_i - k_{i-1}(\theta_i - \theta_{i-1}) + k_i(\theta_{i+1} - \theta_i) - c_i \dot{J}_i = 0$$

$$[0042] \quad (M2) \quad c_i = c_{i,s} * I_{i,s} + c_{i,k} * I_{i,k} \text{ 且 } I_{i,s} + I_{i,k} = 1$$

$$[0043] \quad (M3) \quad I_{i,k} * \dot{\theta}_{safe} \leq \dot{\theta}_i$$

$$[0044] \quad (M4) \quad I_{i,s}, I_{i,k} = 0 \text{ 或 } 1$$

[0045] 模型方程 M1-M4 可表示图 3A 和 3B 中呈线性方式的模型的摩擦。例如,给定段的摩擦状态变量 $I_{i,s}$ 和 $I_{i,k}$ 可通过将 $I_{i,s}$ 设置为 1 以及将 $I_{i,k}$ 设置为 0 来指示所述段是否经受静摩擦力。同样,给定段的摩擦状态变量 $I_{i,s}$ 和 $I_{i,k}$ 可通过将 $I_{i,k}$ 设置为 1 以及将 $I_{i,s}$ 设置为 0 来指示所述段是否经受动摩擦力。这同时满足了 M4 和 M2, 并且可以用于针对给定时间段将摩擦系数 c_i 设置为静摩擦系数 $c_{i,s}$ 或动摩擦系数 $c_{i,k}$ 。由于代价函数使得输入能量最小化并且 $c_{i,s} > c_{i,k}$, 因此 $I_{i,k} = 1$ 将是有利的。关于 M3, $\dot{\theta}_{safe}$ 可表示被认为正在运动中而没有形成静摩擦的段的最小速度或阈值。 $\dot{\theta}_{safe}$ 的值可被选择成尽可能小,但应当通过加入附加的安全因素来弥补由于钻井因素而造成的不可预测的干扰。可例如使用操作数据和统计分析来选择安全因素以确保形成静摩擦的可能性低。

[0046] 代价函数可进一步经受以下约束:

$$[0047] \quad (C1) \quad \tau_{min} \leq \tau_{in} \leq \tau_{max}$$

$$[0048] \quad (C2)$$

$$[0049] \quad \int_0^T \dot{\theta}_i dt = 0$$

[0050] 例如,方程式 C1 使得将施加于该系统的扭矩 τ_{in} 限于顶部驱动机构的容量。方程式

C2确保在时间范围0至T内在钻柱中未存储有能量。尽管仅示出了两个约束,但可加入其他约束,包括对扭矩变化率的限制。

[0051] 在某些实施方案中,可以向建模钻井组件施加第一输入扭矩,并且可以确定每一段的角速度。根据这些角速度,可以确定这些段中的每一段是否以处于或高于 θ^*_{safe} 值的角速度移动,以避免静摩擦。不同的输入扭矩 τ_{in} 值可用于识别在施加最小能量的情况下避免这些段中的每一段上的静摩擦的最小输入扭矩。可针对预定数量的时间段中的每一时间段确定不同的最小输入扭矩,其中钻井组件模型反映了由于来自前一个时间段的优化的扭矩输入而造成的井下情况。在某些实施方案中,实际井下角速度测量值可用于验证和更新该模型。

[0052] 在图4A中示出使用CF1所产生的示例最小输入扭矩 τ_{in} 。可将输入扭矩 τ_{in} 在第一时间间隔T1中设置为最大值 τ^{max} ,直到大多数钻柱都旋转。随后,可使扭矩 τ_{in} 减小至最小值 τ^{min} 而并不形成静止状态,以此使钻柱在工具面不旋转情况下旋转所需的能量最小化。在时间间隔T结束时,可使输入扭矩 τ_{in} 的方向反转以释放钻柱中所存储的能量并使钻柱在相反方向上弯曲。为在不旋转钻头的情况下维持钻柱内的移动,必须通过在这两个方向上施加扭矩来使钻柱不断地弯曲和松开,以便在不旋转钻头的情况下维持钻柱中的移动。

[0053] 图4所示的最小输入扭矩 τ_{in} 可通过以下三个参数来表征:T、T₁和 τ_1 。第一参数T可对应于扭矩信号时段,其中值越大导致施加到钻柱的能量越多,值越小导致在旋转方向之间发生的切换越频繁。第二参数T₁对应于其间顶部驱动器输出其最大扭矩的时间。在某些实施方案中,可使T₁最优化以使得有足够的能量被传输以旋转底部质量,但仅仅快到足以避免静摩擦。第三参数 τ_1 对应于在钻头上方的段开始旋转后,需要维持在顶部的扭矩。

[0054] 虽然最小输入扭矩 τ_{in} 可包括方波,但实际上,可能很难将所述类型的扭矩施加至顶部驱动系统。图4B图示了至少部分地基于最小输入扭矩 τ_{in} 但考虑到物理系统的其他约束的示例控制信号。例如,系统的顶部驱动器可具有最大容许电流,并且利用方波或接近方波驱动顶部驱动器所需的电流可能超过所述电流。通过对容许电流的限制,顶部驱动器的角速度可能不会快速增大,这需要更渐进的控制信号,如在图4B中所见。

[0055] 根据本公开各方面,还可以在无模型的情况下,使用反馈方法确定最小输入扭矩。图5是图示了根据本公开各方面的示例无模型控制系统的图。在所示实施方案中,控制系统500可通过计算输入扭矩 τ_{in} 的优化参数诸如图4的参数来优化输入扭矩 τ_{in} 。具体来说,信号发生器501可产生与图4所示形状类似的输入扭矩 τ_{in} ,其中使用代价函数502来确定参数T₁和 τ_1 。由信号发生器501产生的扭矩 τ_{in} 可用作优化算法502的输入。钻柱的位于钻头上方的那部分的测量角速度 $\theta \cdot_{\text{bot}}$ 或估计角速度 $\theta_e \cdot_{\text{bot}}$ 还可用作代价函数502的输入。

[0056] 在某些实施方案中,代价函数502可包括极值搜索控制形式。例如,在所示实施方案中,代价函数502包括:

$$[0057] \quad J = \int \left[W_1 (\theta^*_{\text{safe}} - \theta \cdot_{\text{bot}})^2 + (W_2 * \theta \cdot_{\text{top}}) + W_3 \left(\frac{d\tau_{\text{in}}}{dt} \right)^2 \right] dt$$

[0058] 其中 $\theta \cdot_{\text{bot}}$ 是钻柱的位于钻头上方的那部分的测量角速度或估计角速度; $\theta \cdot_{\text{top}}$ 是钻柱的连接至顶部驱动器的顶部处的角速度; θ^*_{safe} 是被认为是在运动中而没有形成静摩擦的段的最小速度; $d\tau_{\text{in}}/dt$ 对应于输入扭矩信号的变化率;并且W₁、W₂和W₃是分别对应于底部速度、顶部速度和扭矩变化的加权因子。第一项 $(\theta^*_{\text{safe}} - \theta \cdot_{\text{bot}})^2$ 使钻柱的位于钻头上方的那

部分的角速度降低到低于避免静摩擦所需的最低速度的量二次地增加。理想的情况是, $\dot{\theta}_{\text{bot}}$ 将逼近等式 $\dot{\theta}_{\text{safe}}$ 以使这一项归零。第二项包括 $\dot{\theta}_{\text{top}}$, 以使旋转钻柱顶部所需的速度以及因此能量最小化。理想的情况是, $\dot{\theta}_{\text{top}}$ 将尽可能低, 以使钻柱底部维持在 $\dot{\theta}_{\text{safe}}$ 值。第三项对应于在理想情况下较低的扭矩变化率, 以减少大的扭矩变化。

[0059] 可通过低通滤波器503馈送代价函数502的输出。调制信号504可用于在这些系统中产生扰动以确定代价函数502的梯度。在所示实施方案中, 调制信号504包括 $a \sin wt$ 。可将调制信号504以不同的幅值和频率添加到 T_1 和 τ_1 两者, 这样可以独立测量它们的效果。在获得代价函数值后, 使调制信号504与代价函数值相乘以解调梯度信息。一旦发现梯度, 信号发生器501即改变标称扭矩输入 τ_{in} , 以寻求代价函数502的优化操作条件。

[0060] 图6是图示了根据本公开各方面的示例控制系统600的图。控制系统600约控制系统500类似, 以下除外: 输入扭矩 τ_{in} 并不以图4所示的形式参数化。相反, 切换模块601用于调整代价函数602的权重。例如, 首先可将 W_1 和 W_3 设置为0, 并且 W_2 可为负数。因此, 代价函数602试图使顶部上的速度最大化, 导致产生最大输入扭矩 τ_{in} 。当检测到输入扭矩发生突然变化或底部速度被估计为大于0时, 切换模块601可将 W_1 和/或 W_3 变为非常大的数字并且可将 W_2 变为小的数字。在这些加权条件下, 代价函数602随后可试图使底部保持尽可能慢, 和/或保持输入扭矩尽可能平滑。在某些实施方案中, 该控制系统600可用于通过改变加权因子来使用同一控制器连续控制该系统, 以考虑不同的操作模式。

[0061] 因此, 本公开非常适于实现所提及的目标和优点以及其中所固有的那些目标和优点。上面所公开的具体实施方案仅仅是说明性的, 因为本公开可以修改并且以不同, 但对获益于其中的教导的本领域技术人员的显而易见的等同方式实施。此外, 除了如随附权利要求所述之外, 不试图去限制本文所示的构造或设计的细节。因此, 显然, 可以对以上所公开的具体示例性实施方案进行改进或修改, 并且所有这些变化都被认为落在本公开的范围和精神内。另外, 在随附权利要求中的术语也具有其显明、普通的意义, 除非另外地明确地且明显地通过专利权所有人限定。如权利要求书中使用的冠词“一”或“一个”在本文中定义成表示所介绍元件中的一个或超过一个。

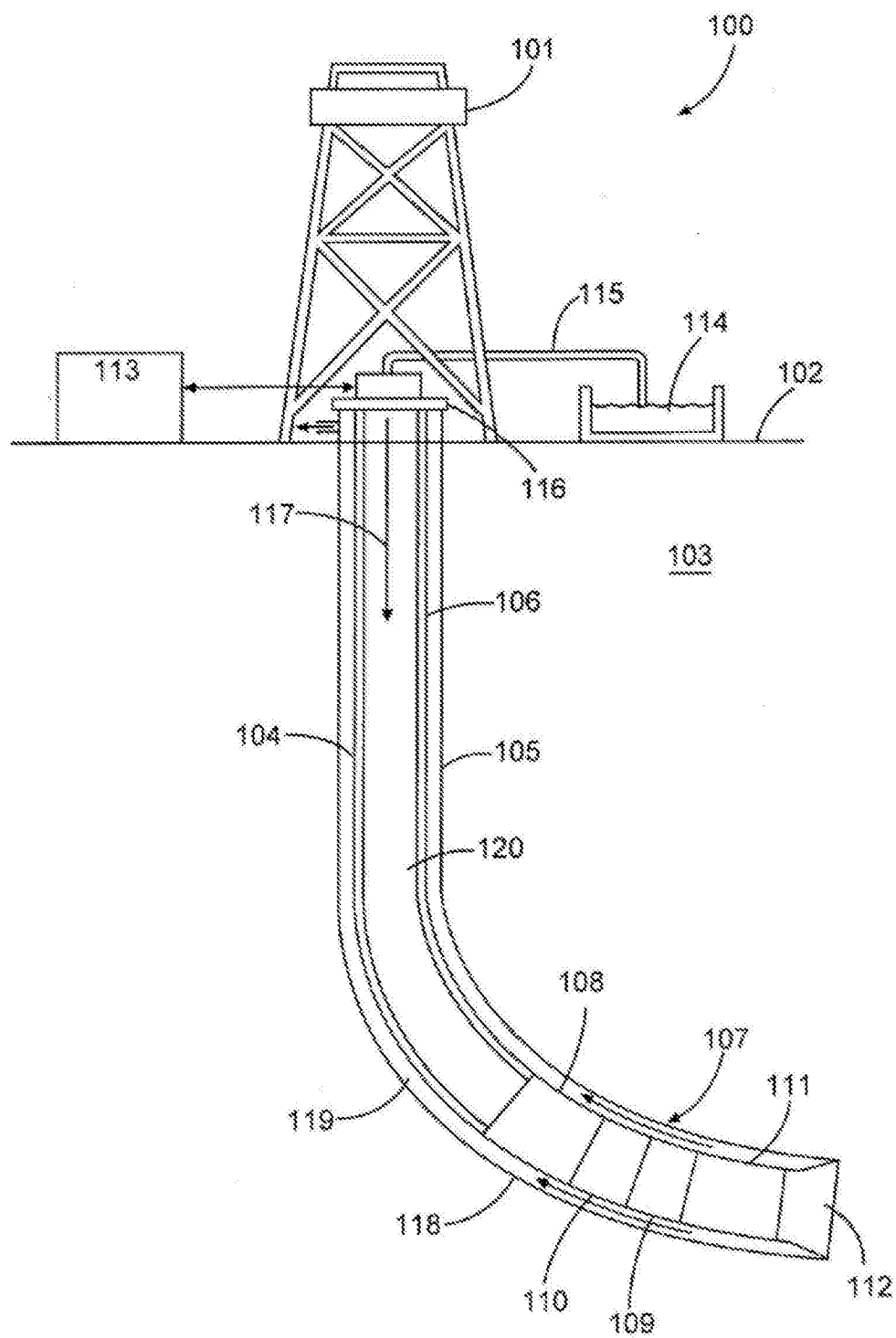


图 1

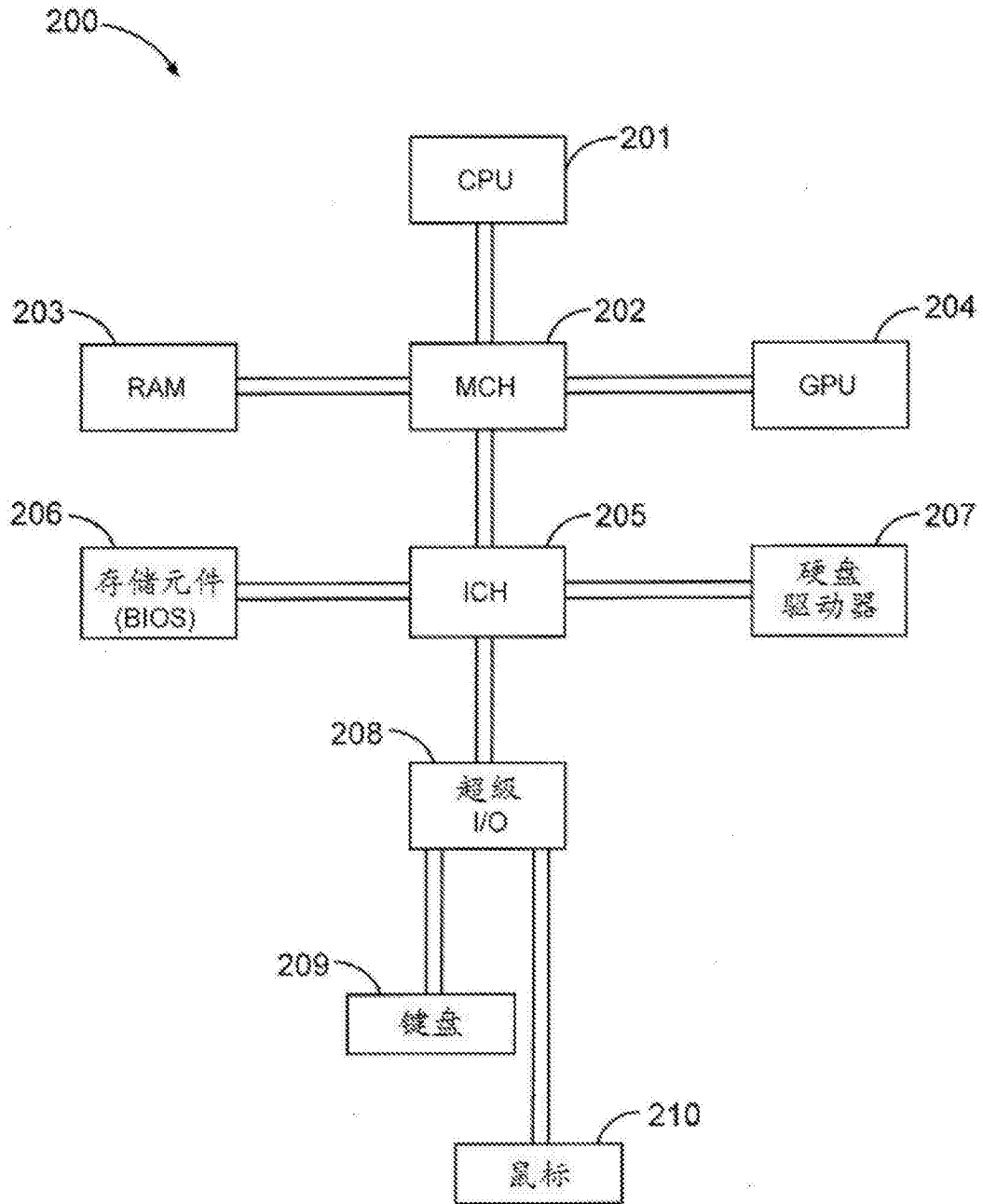


图2

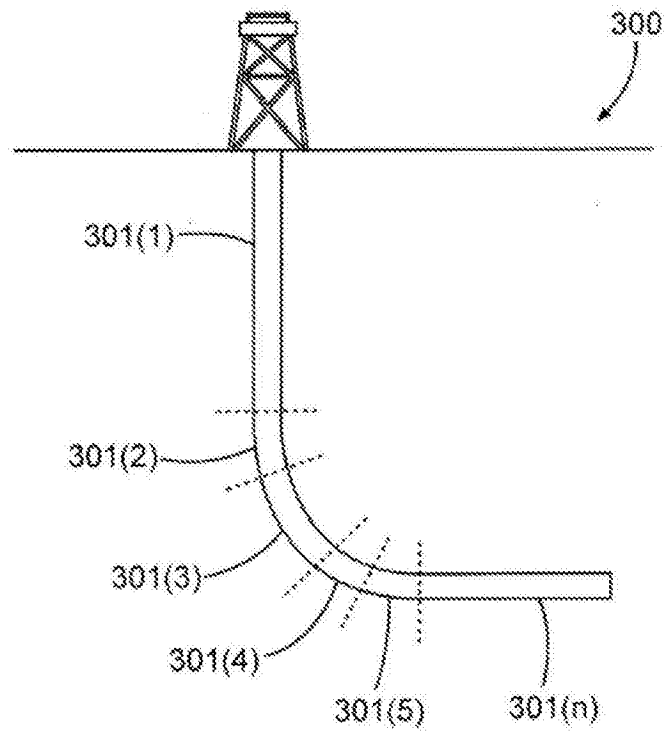


图3A

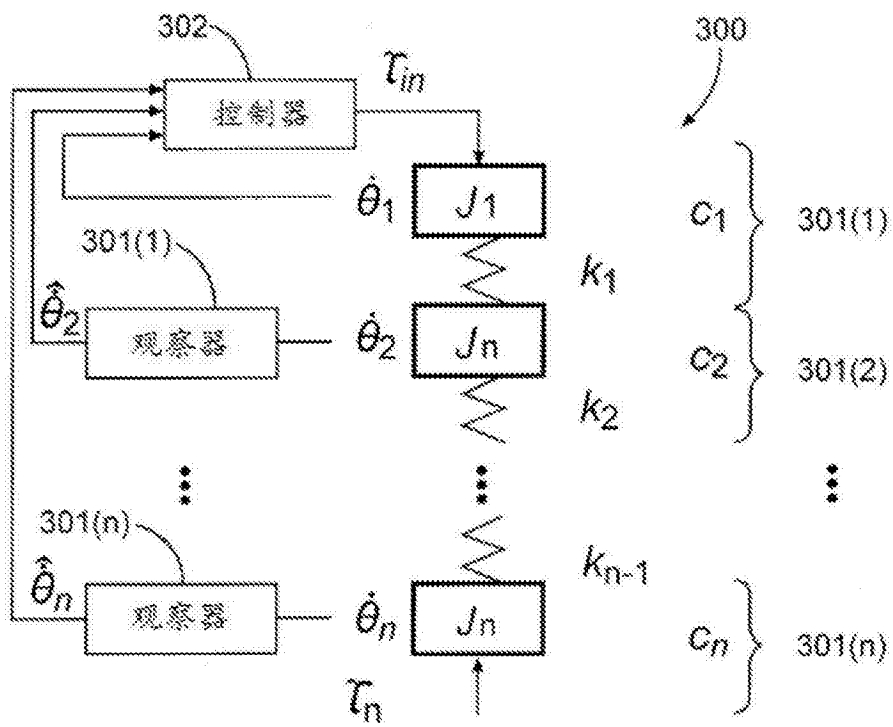


图3B

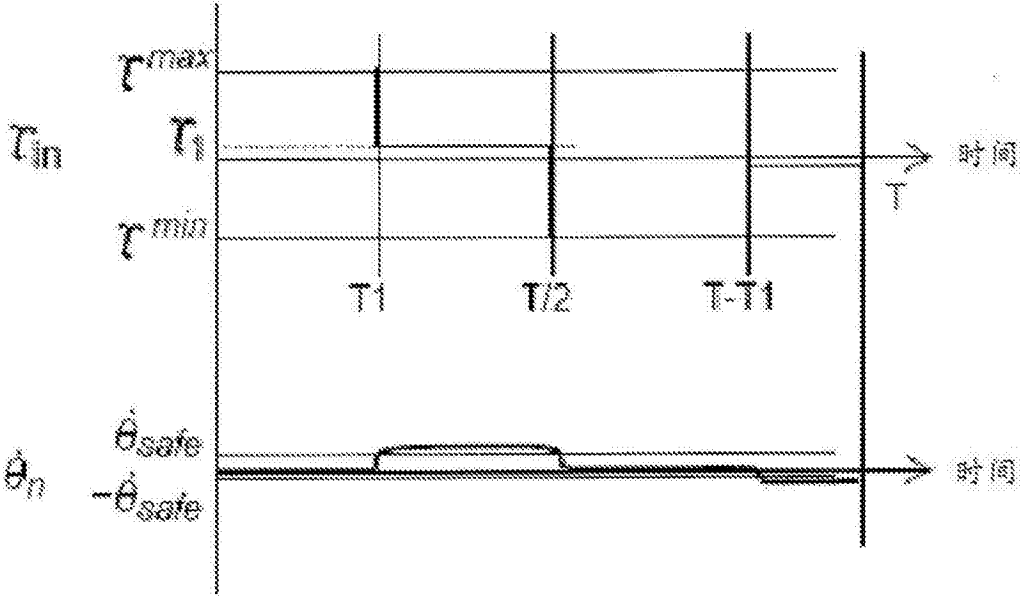


图4A

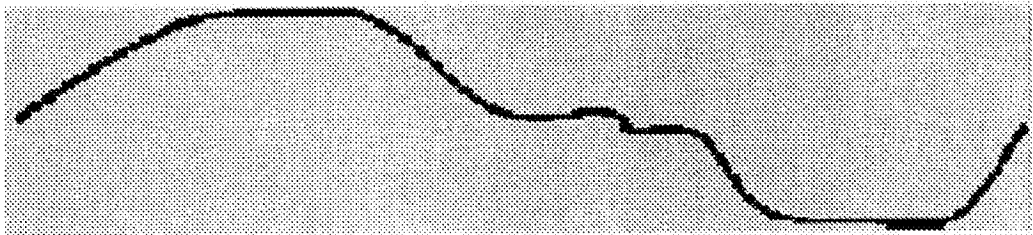


图4B

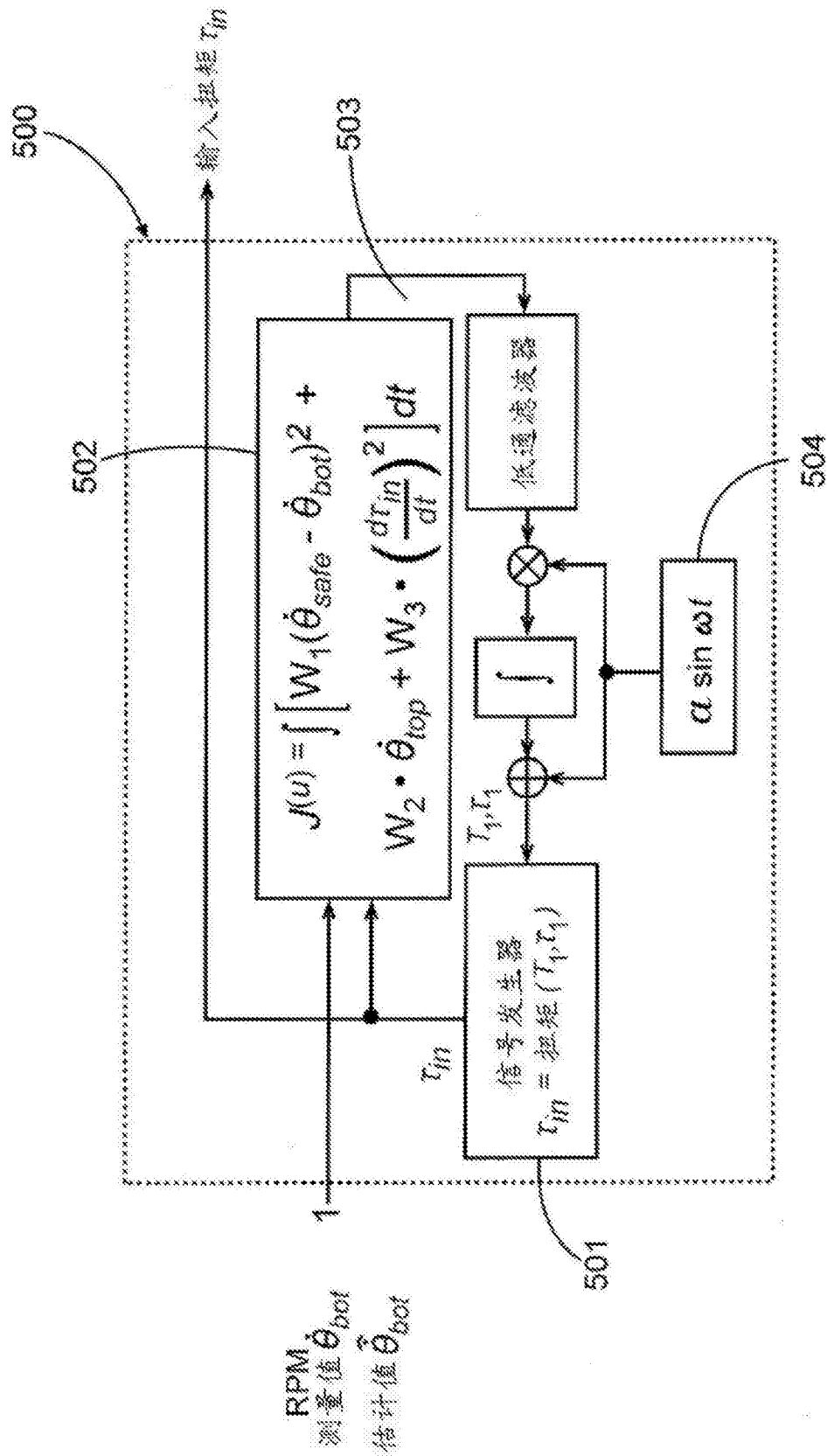


图5

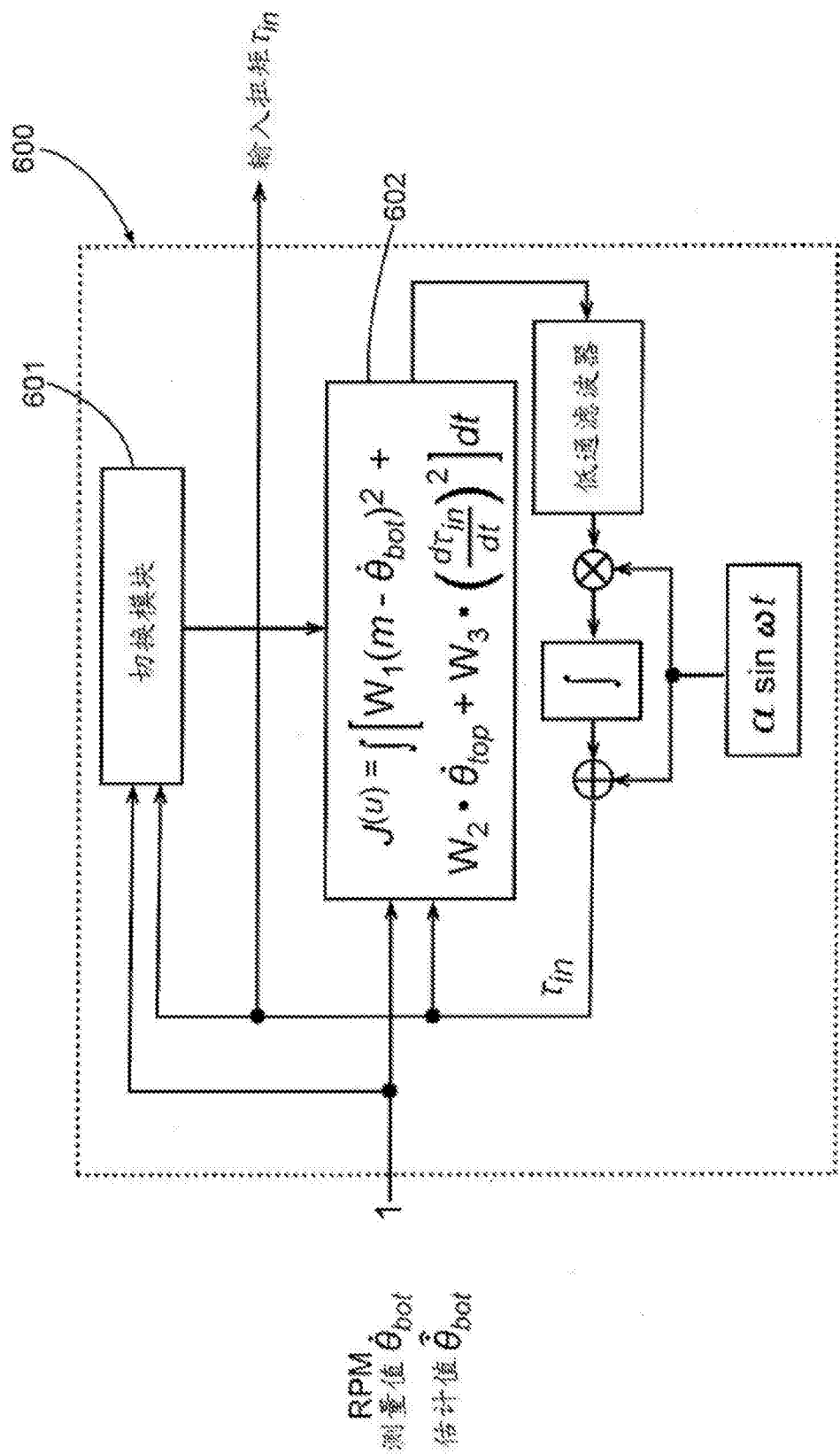


图6