

DOI: 10.3969/j.issn.2095-509X.2019.01.010

# 顶驱双向吊环倾斜机构结构的动态可靠性分析

乔目, 张力

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了提高双向吊环机构的工作效率以及钻杆的安装精度, 基于机械系统虚拟样机技术对该机构进行简化, 求出力学模型。将机构中的中间连杆视为柔性杆件, 利用可靠性分析的基本理论方法——蒙特卡罗法分析双向吊环倾斜机构结构的强度可靠性、形变可靠性, 求出了该机构中中间柔性连杆的可靠度, 为该机构作为顶驱重要组成部分在实际工况中的应用以及设计提供了有力参考。

关键词: 吊环机构; 虚拟样机技术; 柔性连杆; 可靠度

中图分类号: TE9 文献标识码: A 文章编号: 2095-509X(2019)01-0040-03

20世纪80年代顶部驱动装置应运而生, 其作为一种新的钻井作业形式, 有效提高了钻井的工作效率和安全性, 是整个石油工业中的一项技术革新, 目前已经在世界范围内得到广泛应用与发展。顶部驱动装置利用齿轮减速系统将电动机的高转速、小转矩转换成低转速、大转矩, 驱动钻杆旋转作业。它可以从整个井架的任意位置驱动钻具, 消除了空间限制, 同时可以沿着井架上的导轨向下运送钻杆, 完成钻井液循环、上卸扣、接立柱等工艺操作。与传统转盘式钻井作业方式相比, 不仅节约钻井时间, 而且安全高效。但是顶部驱动装置也存在不足之处: 其一, 由于地层结构的不同, 容易使钻具在起钻、下钻时产生卡钻; 其二, 劳动强度大, 容易损坏。冯琦等<sup>[1]</sup>对比分析了几种典型顶部驱动装置(TDS-11SA、TDT500ECI、DQ70BS)的结构、传动控制系统以及基本技术参数。蔡郑敏等<sup>[2]</sup>利用能量法对倾斜液压机构的临界载荷进行了计算分析, 以确保该机构安全可靠, 但是没有对双向吊环倾斜机构的结构可靠性进行研究。双向吊环倾斜机构作为顶部驱动装置的重要组成部分, 如果损坏将直接影响钻柱的精确连接, 影响钻采效率及工作安全, 因此对双向吊环倾斜机构的结构进行可靠性分析具有重要意义。

## 1 模型建立

图1为双向吊环倾斜装置, 依据机械系统虚拟样机技术的基本原理, 利用Lagrange方程建立四杆机构的动力学模型<sup>[3-4]</sup>, 如图2所示。



图1 双向吊环倾斜装置

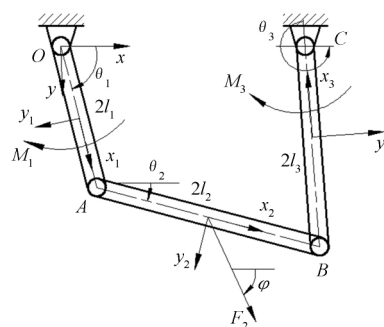


图2 机构动力学模型

坐标系设置不同, 得到的约束方程形式也会有差异, 但是不同坐标系下得到的约束方程形式总存在一定的数量关系。这里以广义坐标定义四杆机构的位置坐标, 双向吊环倾斜机构的Lagrange函数为:

$$L = \sum_{i=1}^3 (T_i - V_i) + M_1 \theta_1 + F_2 [2l_1 \cos(\theta_1 - \varphi) + l_2 \cos(\theta_2 - \varphi)] + M_3 \theta_3 \quad i = 1 \ 2 \ 3 \quad (1)$$

收稿日期: 2017-05-05

作者简介: 乔目(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为顶驱载荷实时特性虚拟仿真与真实性描述, qiaopeimu888@163.com.

式中:  $T_i$  为构件的动能;  $V_i$  为构件的势能。相关物理量的计算如下:

$$T_1 = \frac{1}{2}(m_1 l_1^2 + I_1) \dot{\theta}_1^2$$

$$T_2 = \frac{1}{2}(m_2 l_2^2 + I_2) \dot{\theta}_2^2 + 2m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 +$$

$$2m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$T_3 = \frac{1}{2}(m_3 l_3^2 + I_3) \dot{\theta}_3^2$$

$$V_1 = m_1 g l_1 \sin \theta_1$$

$$V_2 = m_2 g (2l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2)$$

$$V_3 = m_2 g l_2 \sin \theta_3$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $m_i$  为杆的质量;  $l_i$  为杆长的一半;  $\theta_i$  为杆的角速度;  $I_i$  为杆的转动惯量。

利用 Lagrange 函数求得的双向吊环机构的动力学方程为

$$M\ddot{q} + c(\dot{q}, q) = f$$

其中:

$$M =$$

$$\begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + 4m_2 l_2^2 + I_1 & 2m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & 0 \\ 2m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & 4m_2 l_2^2 + I_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 l_3^2 + I_3 \end{bmatrix}$$

$$c(\dot{q}, q) = \begin{bmatrix} 2m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ -2m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f =$$

$$\begin{bmatrix} m_1 g l_1 \cos \theta_1 - 2m_2 g l_2 \cos \theta_1 + M_1 - 2F_2 l_1 \sin(\theta_1 - \varphi) \\ -m_2 g l_2 \cos \theta_2 \\ -m_3 g l_3 \cos \theta_3 + M_3 \end{bmatrix}$$

式中:  $M$  为构件的力矩;  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  分别为广义坐标及其导数;  $f$  为弹性力和驱动力。

## 2 机构可靠性分析的理论基础

本文通过建立顶驱双向吊环倾斜机构力学模型,分析其在某时域内的运动情况。在运动时域  $T$  内,可以将双向吊环倾斜机构视为由细长杆件构成的柔性机构,按照一定的时间间隔进行离散,形成多个随机拓扑结构,从而分析其可靠性。对该柔性机构的结构进行可靠性分析的基本理论如下:如图 2 所示,在时域  $T$  内运动的整个机构有 3 个可动构件,其中包含 1 个柔性连杆。那么,3 个构件的动态响应  $S_i(x_i, t)$  ( $t \in T$ ) 就是一个随机的非平稳过程,其中  $x_1, x_2, x_3$  分别为影响 3 个构件动态响应的随机向量。3 个构件在运动时间范围内,其动态响应输出值  $S_i(x_i, t)$  应在允许的范围内,即机构中各构件可靠度为杆件的动态响应输出值小于其动态响应许用值的概率。

双向吊环倾斜机构进行可靠性分析的方法包括

一次可靠度分析法、混沌优化可靠度分析方法、蒙特卡罗法(Monte Carlo method) 3 种常用方法。其中蒙特卡罗法是主要的动态系统可靠性分析方法,其重点在于解决对模拟精度和模拟效率要求较高以及任意分布随机变量的抽样两个基本问题。利用蒙特卡罗法对机构进行可靠性分析的基本步骤如下<sup>[5]</sup>:

1) 将双向吊环倾斜机构运动的随机过程进行离散,形成多个单位随机过程,然后抽取若干个单位随机过程。

2) 抽取离散的若干个单位随机过程产生随机变量,并将随机变量代入目标功能函数。

3) 求出整个随机过程的方差和均值。

## 3 双向吊环倾斜机构的可靠性分析

### 3.1 机构结构的强度可靠性分析

在建立顶驱倾斜机构力学模型的基础上,将机构看成连杆机构分析其强度可靠性。传统上,可将机构系统中的所有构件均作为刚体对待,但考虑到刚体假设的分析误差比较大,可以将此机构中的中间连杆作为柔性体进行分析,即将该双向吊环倾斜机构看作是柔性机构。柔性机构产生强度破坏主要是由动态应力造成的,它造成的形变与刚体运动会产生耦合<sup>[6]</sup>。顶驱双向吊环倾斜机构在执行钻杆抓取、安装动作时各构件中会产生较大的激励振幅,使其动态应力的响应值加大,对倾斜机构产生严重的破坏。因此,要求倾斜机构在执行各种动作时应满足运动时域  $T$  内任意时刻的动态强度响应值应小于材料的弹性极限强度,以满足双向吊环倾斜柔性机构对动态强度可靠性的要求,即  $\sigma_{si}(t) < \sigma_{ei}$ ,其中  $\sigma_{si}(t)$  为构件  $i$  在  $t$  时刻的动态应力的响应值,  $\sigma_{ei}$  为构件材  $i$  的料弹性极限强度,从而可以推出该倾斜机构的动态强度可靠度为:在时域  $T$  内,各构件运动时的动态应力响应值小于构件材料弹性极限强度的概率。一般的,石油钻机在不同的地理环境(陆地、海洋、沙漠)下工作,随机因素影响不同,因此双向吊环倾斜机构中产生最大动态响应应力的时刻和位置也不确定。故双向吊环倾斜机构在设计、生产、制造、安装的过程中要考虑诸多随机因素,以满足机构的动态强度特性,提高机构的可靠度,进而提高生产效率。

### 3.2 机构结构的形变可靠性分析

运用蒙特卡罗法的基本思想分析机构的形变可靠性,无需将状态函数线性化,具有直接解决问题的能力<sup>[7]</sup>。双向吊环倾斜机构在执行抓取、连接钻杆动作的过程中柔性连杆易发生塑性变形,变形过大的话,将会造成该机构的运动轨迹发生偏离,进而影响整个钻进过程。可见,确定双向吊环倾斜机构运动轨迹的最大容许形变量,以保证钻探作业的顺利进行是很有必要的。当构件的固有频

率接近振动耦合频率时,该机构系统会产生谐振,进而出现很大的动态响应应力,造成柔性构件发生较大形变,使得机构无法按照预定轨迹运动。因此,为了让双向吊环倾斜机构能够在任意时域内正常工作,构件在任意时刻的形变动态响应都应在允许的范围之内。一般情况下,由于中间连杆的形变较大,容易因产生塑性变形而失效,那么双向吊环倾斜机构的动态形变可靠性就可以表示为机构在时域内运动时柔性连杆的最大形变量小于其允许值的概率。

为方便计算将双向吊环倾斜机构看成是由细长杆构成,基本参数见表 1。杆 1 以  $5(^{\circ})/s$  的速度驱动整个机构旋转,转动的角度范围为  $-35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。其中连杆 2 中点的最大形变量  $S_2(x_2)$  的影响因素包括杆 1 的角速度及长度、杆 3 的长度,即连杆 2 的随机影响因素  $x_2 = (\omega_1, 2l_1, 2l_3)$ 。整个双向吊环倾斜机构中的各分量服从正态分布,且各变量的标准差为  $u = (2, 1, 1)$ 。每个变量可以取不同的数值,因此每个铰接点的位置也会有所差异。在机械系统动力学分析软件 ADAMS-insight 的环境下<sup>[8]</sup>,对建立的柔性机构进行运动仿真,仿真时间为 30min,运用蒙特卡罗法的基本思想对  $x_2$  的各个变量进行 60 次抽样,得到柔性连杆 2 的最大形变量,抽样结果如图 3 所示,则此时的可靠度为  $R = (S_2(x_2) \leq S_{c2})$ 。由图 3 可知,  $S_2(x_2) = 4.85\text{mm}$ 。

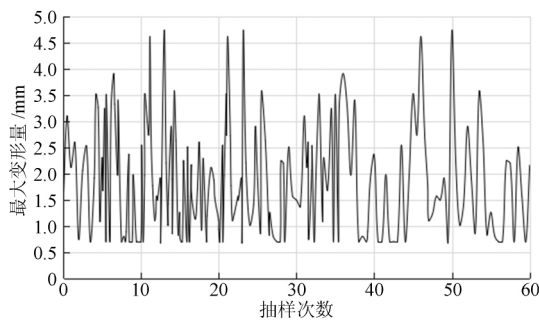


图 3 蒙特卡罗法 60 次抽样结果

### The dynamic reliability analysis on the structure of the top drive bidirectional lifting device

Qiao Mu, Zhang Li

(College of Mechano-Electronic Engineering,

Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

**Abstract:** In order to improve the working efficiency of the two-way lifting ring mechanism and the installation accuracy of the drill pipe, it simplifies the mechanism based on the virtual prototype technology of the mechanical system, builds the mechanical model, takes the intermediate link in the mechanism as a flexible member, analyzes the strength reliability and deformation reliability of the structure for this tilting mechanism of the two-way lifting ring based on theoretical reliability Monte Carlo method. The reliability of the flexible connecting rod provides a powerful reference for the application and design of the mechanism as an important part of the top drive in actual working conditions.

**Key words:** ring mechanism; virtual prototype technology; flexible link; reliability

表 1 机构基本参数 mm

	杆 1	杆 2	杆 3
长度	300	700	500
厚度	15	18	10
宽度	18	30	30

## 4 结论

为确保顶部驱动装置双向吊环倾斜机构在复杂工况中正常运转,本文对其进行可靠性分析,得出以下结论:

- 1) 对双向吊环倾斜机构进行可靠性分析时应充分考虑设计、制造、安装过程中随机因素的影响;
- 2) 双向吊环倾斜装置作为顶部驱动装置的重要部件,承载着钻杆安装的整个过程,分析其可靠性,对于提高钻杆抓取的精确性、安全性,确保钻井作业安全高效地进行具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 冯琦,郭永岐,桑峰军.典型顶部驱动钻井装置结构与功能分析[J].石油矿场机械,2013,42(9):90-94.
- [2] 蔡郑敏,张军,申朝廷,等.顶驱钻井装置倾斜液压机构临界载荷计算分析[J].石油矿场机械,2010,39(3):48-50.
- [3] 郑相周,唐国元.机械系统虚拟样机技术[M].北京:高等教育出版社,2010:215-221.
- [4] 李有堂.机械振动理论及应用[M].北京:科学出版社,2012:45-65.
- [5] 吕震宙,宋述芳,李洪双,等.结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析[M].北京:科学出版社,2009:98-107.
- [6] 于霖冲,白光忱.柔性机构动态可靠性分析[M].北京:机械工业出版社,2012:26-30.
- [7] 董艳秋,田敬博.蒙特卡罗法结构可靠性分析[J].黑龙江工程学院学报,2010,24(1):27-29.
- [8] 韩彦彬,白光忱,李晓颖,等.柔性机构动态可靠性分析的新方法[J].计算力学学报,2014,31(3):291-295.