

大位移井钻柱振动规律研究与应用^{*}

韩春杰 阎铁

(大庆石油学院)

韩春杰等.大位移井钻柱振动规律研究与应用.天然气工业,2006,26(5):72-74.

摘要 在大位移井钻井工程中钻柱受着各种振动,当各种振动共振时,钻柱承受着非常大的动载,很容易受损,同时,钻柱的振动影响着井壁的稳定,严重威胁着井下的作业安全。以大位移井近井底的钻柱为研究对象,分析了钻柱振动行为所遵循的规律。采用线性分析法,获得了大位移井钻柱横向振动和扭转振动的频谱方程。同时获得了钻柱各种共振频率的分布。经分析表明:大位移井钻柱的横向振动和扭转振动的共振频率与实际钻井转速非常接近,应合理选择转速以减小钻柱共振的发生。文章的分析研究为大位移井钻柱动态行为的研究提供了理论依据。

关键词 钻井 大位移井 水平井 钻柱 横向振动 扭转振动

大位移井一般指井的水平位移与井的垂深之比大于或等于2的定向井。在富含油气储量的浅海滩涂地区,钻井船无法进入,钻大位移井是开发该区域油气资源的最佳选择。大位移井钻柱的动态问题是影响钻柱安全和井壁稳定的主要问题,钻头与地层、钻柱与井壁之间的相互作用很复杂,无规则的摩擦扭矩导致有各种振动形式存在,振动的共振状态会导致钻柱与井壁严重受损,威胁着井下的作业安全。通过井下随钻测量仪(SWD)测得,大位移井钻进过程中,钻柱的振动形式一般包括横向振动,扭转振动和轴向振动。文章分析横向振动和扭转振动,通过对井底的很长钻柱的力学分析研究,获得了振动的规律,结合实际进行了应用。该问题的研究对大位移井在钻井过程中保持井壁稳定、减小钻具失效、提高钻井效率,降低钻井成本有一定的理论意义和现实意义。

一、大位移井钻柱的横向振动

在大斜度井或大位移井中使用的井底钻具组合(BHA)包括一个非常短的钻柱稳定器和躺在井眼底边的很长的钻柱部分。钻柱在压力载荷的作用下以很大的转速旋转以达到清洁井壁的作用,使横向振动很可能发生。本文采用线性分析法分析井底钻柱

的横向振动。如图1,在井斜角为 θ 井眼内有一段长为的钻柱。假设钻柱为一弹性梁模型,钻柱横截面离开平衡位置的位移为横向位移 x 、 y 和轴向位移 z , x 、 y 和 z 是弧长(s)和时间(t)的函数,钻柱受到的轴向力为 F 。不考虑钻柱受到的摩擦。井眼直径为 H ,钻柱的内、外直径分别为 d 和 D ,钻柱横截面离开平衡位置的角度为 α 。假定钻柱始终和井壁接触,在极坐标系中,侧向位移 x 、 y 可以用一个变化的角(α)表示。

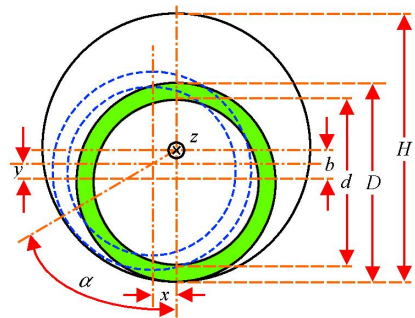


图1 大位移井钻柱横向振动图

$$x = b \sin \alpha, y = b \cos \alpha \quad (1)$$

式中: $b = (H - D) / 2$ 是井眼与钻柱外径的半径间距。

轴向位移 z 由侧向位移引起的,轴向位移和侧

^{*} 本文为中国石油天然气集团公司创新基金项目(编号:2001ex-2t)。

作者简介:韩春杰,女,1969年生;1992年毕业于哈尔滨师范大学,获学士学位。2004年毕业于大庆石油学院石油工程学院,获硕士学位。现为大庆石油学院电子科学学院教师。地址:(163318)黑龙江省大庆市大庆石油学院电子科学学院。电话:(0459)6503366。E-mail:hcyj6101@sina.com

向位移的关系为：

$$z'z = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{r} - 2xx' - 2yy' \right) \quad (2)$$

式中： x', y', z' 分别为 $\partial x/\partial s, \partial y/\partial s, \partial z/\partial s$ 。

在保守力的作用下，当给予广义坐标和速度一个微小的扰动时，则：

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (3)$$

式中： δT 为系统内部惯性力做的功； δU 为弹性势能； δW 为系统外部惯性力做的功^[1]。

$$\delta T = \int_0^l \rho A (\delta \dot{x} x + \delta \dot{y} y) ds \quad (4)$$

$$\delta U = \int_0^l EI (\delta x'' x'' + \delta y'' y'') ds \quad (5)$$

$$\delta W = \int_0^l \cos \theta dz + \sin \theta dy) ds - F \delta z (s=l) \quad (6)$$

式中： x, y 分别为 $\partial^2 x/\partial t^2, \partial^2 y/\partial t^2$ ； $x'' = \partial^2 x/\partial s^2$ ； $y'' = \partial^2 y/\partial s^2$ ； ρ 为材料的质量密度； A 为钻柱的横截面积； E 为材料的弹性模量； I 为横截面惯性矩； $I = \pi(D^4 - d^4)/64$ ； $q = (\rho - \rho_g)g$ ； A 为单位长钻柱受到的浮重； ρ_g 为钻井液密度。

相对于很大的井眼， θ 一般很小， $\sin \theta \approx \theta, \theta' = 0$ ，将方程(4)、(5)、(6)代入方程(3)，钻柱横向振动微分方程为：

$$\rho A a + \frac{q \sin \theta}{r} \alpha + [F - q \cos \theta (l-s)] \alpha' + EI \alpha''' = 0 \quad (7)$$

方程(7)的解为：

$$\alpha(s, t) = [c_1 \cos(k_1 s + \varphi) + c_2 \sin(k_2 s + \varphi)] \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

式中： $c_1, c_2, \varphi, \varphi$ 是和初始条件有关的常数。 ω 为钻柱横向振动的固有频率。

假设钻柱两端固定边界条件，则：

$$\begin{cases} \alpha(s=0) = 0 & \alpha''(s=0) = 0 \\ \alpha(s=l) = 0 & \alpha''(s=l) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

利用方程(9)、(10)得钻柱横向共振频率(f_n)。

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 \frac{EI}{\rho A} - \frac{f_n}{\rho A} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 + \frac{q}{r\rho A}} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

二、大位移井钻柱的扭转振动

大位移井的接近井底钻柱很容易发生扭转振动，如图2。在分析钻柱的扭转振动时，沿钻柱轴向建立 x ，微元段为 dx ，振动扭转角位移 $\theta = \theta(x, t)$ ，对应的扭矩为 $M = M(x, t)$ ^[2]，井斜角为 θ 。假设钻柱为等直杆，忽略钻柱受到的摩擦力。

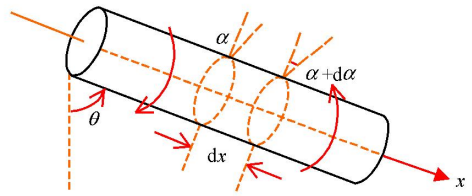


图2 大位移井钻柱的扭转振动图

扭矩(M)与微元段相对转角 $\frac{\partial \alpha}{\partial x}$ 的关系为：

$$M = GJ_p \frac{d\theta}{dx} \quad (11)$$

根据达朗贝尔原理，微元段的动力学方程为：

$$M + \frac{\partial M}{\partial x} dx - M = I_p \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} \quad (12)$$

式中： G 为剪切弹性模量； J_p 为截面极惯性矩； I_p 为微元段的横截面惯性矩； $I_p = \rho J_p dx$ 。

将方程(12)代入方程(13)得：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(GJ_p \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) dx = \rho J_p \frac{d^2 \alpha}{dt^2} dx \quad (13)$$

设 $a = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ 表示剪切波在杆内的传播速度，它小于纵波的传播速度^[3-4]。则方程(13)通解为：

$$\alpha(x, t) = \left[A' \sin\left(\frac{\omega}{a} x\right) + B' \cos\left(\frac{\omega}{a} x\right) \right] \sin(\omega t + \varphi) \quad (14)$$

式中： ω 为大位移井钻柱扭转自由振动角频率，假设大位移井钻柱的稳斜段的井斜角 90° ，旋转体为一端固定一端自由的转体，扭转振动的固有频率(f_n)为：

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n a}{4l} = \frac{n}{4l} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

三、实例分析

分析 $\varnothing 216$ mm井眼的一个 $\varnothing 172$ mm的BHA组合。集中考虑随钻测量仪(MWD)以上的钻柱部分。14个具有抗压性能的钻柱(CSDP)，整个长度130 m。CSDP的几何尺寸为：外径127 mm，内径72 mm。在分析中，提供了100 kN的连续钻压和6.5 kN·m的连续扭矩。 $EI = 2.4 \times 10^6$ Nm， $q = 539.2$ N/m， $\rho = 7.85 \times 10^3$ kg·m⁻³， $\rho_g = 1.2 \times 10^3$ kg·m⁻³， $G = 7.8 \times 10^5$ kPa。在其他条件相同的情况下，钻柱的横向共振频率随阶数的改变而变化，从分析可看出，钻柱的横向振动的固有频率的值的范围很大，从3 Hz到很大的数值； $n=1$ 时 f_n 并不是最小，随着 n 的增大 f_n 值逐渐缓慢降低；当 $n=6$ 时， $f_n =$

3.05 Hz,是最小值,这是因为当 n 值很小时,频率的值受浮重(q)、间隙半径(r)、钻柱单位长的质量(ρ)影响较大,但随着 n 的增大钻柱的横向固有频率取决于弯曲刚度(EI)、单位长钻柱质量(ρ)、钻柱长(l)、钻压(F)以及 n 的值。横向固有频率在 3~3.1 Hz 较集中,这是值得注意的。在考虑井底的一段钻柱只存在扭转振动情况下,通过对大位移井钻柱的共振频率随钻柱长度的变化分析,可看出,进入稳斜段以后,随着钻柱长度的增加,钻柱的扭转刚度逐渐减小,钻柱的扭转共振频率逐渐降低。从振动动力学得知,在扭转振动的一阶主频共振时的振动最为强烈。对于大位移井水平井段钻进中的对比分析:随着大位移井水平位移的不断增大,钻进方式为滑动钻进和旋转钻进,一般振动发生在旋转钻进过程中,各种振动都有共振的可能。水平位移比较小时,扭转振动的共振频率集中于 2 Hz(120 r/min),横向振动的共振频率在 3 Hz 左右,随着水平位移的增大,横向振动的固有频率变化不大,扭转振动的固有频率逐渐降低,表现为低频特征,容易诱发“粘—滑”振动^[4]。

四、结 论

大位移井钻柱振动现象普遍存在,本文所建立

的各种振动的力学模型和研究方法是有效的。横向振动的发生几率相对来说比较大,钻井中的各个环节、各个部位都有可能发生。扭转振动是非线性的,它对钻柱及井壁的稳定产生很大的破坏,增加了钻井作业的难度。获得了大位移井钻柱的各种情况下的振动固有频率,为钻井钻速提供了力学依据。每一口井的钻井情况不同,本文只提供了分析解决问题的方法。

参 考 文 献

- [1] HEISIG G, NEUBERT M. Lateral drill string vibration in Extended - Reach Wells [J]. In Society of Petroleum Engineers, IADC/SPE 59235.
- [2] SOPHIANOPOULOS D S, MOCHALTSOS G T. Combined torsional - lateral vibration of beams under vehicular loading. In: formulation and solution techniques [J]. Mechanics, Automatic Control and Robotics, 1999, 2(9).
- [3] 林元华, 邹波, 等. 考虑钻柱运动状态的疲劳寿命预测研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(5).
- [4] 韩春杰, 阎铁. 大位移井钻柱“粘滞—滑动”规律研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(11).

(收稿日期 2005-12-16 编辑 钟水清)