

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2018026

近钻头井下钻具运动特征及异常状态分析方法

王 超¹, 李 军¹, 柳贡慧^{1,2}, 张 涛³, 徐小峰⁴

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2. 北京工业大学,北京 100124; 3. 北京信息科技大学信息与通信工程学院,北京 100101; 4. 中国石油冀东油田分公司钻采工艺研究院,河北唐山 063000)

摘要: 目前利用相关理论模型并结合地面录井参数分析井下钻具运动特征及异常状态的方法不够准确。基于快速傅里叶变换理论和PDC钻头牙齿受力方程,建立了井底钻具运动特征的分析方法;根据一维不稳定流动理论,结合加速度理论,建立了井底异常状态的分析方法。理论分析结果与现场试验数据吻合较好。理论分析及实测结果表明:在实测井段中,滑动钻进时井底各工程参数的频谱图中存在与螺杆转子相同转动频率的主频,旋转钻进时井底各工程参数的频谱图中存在2个主频,一个与螺杆转子的转动频率相等,另一个与钻柱的转动频率相等;井底钻具阻卡后,管内压力出现第一个压力峰值的时间是环空压力出现第一个压力谷值时间的2倍,同时扭矩及振动传感器读数变化剧烈。研究表明,利用井底工程参数频谱图的主频特征可以区分滑动钻进与旋转钻进阶段,同时可获得井底钻具及螺杆的转动状态;利用管内压力、环空压力、扭矩及加速度传感器的读数变化特征可判断井下是否出现异常。建立的分析方法可为安全快速钻井及井下专家系统的建立提供理论参考。

关键词: 井下钻具;运动特征;异常状态;分析方法

中图分类号: TE21 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2018)02-0050-08

An Analytical Method for Determining the Motion Characteristics and Abnormal Conditions of Near-Bit Bottom Hole Assembly

WANG Chao¹, LI Jun¹, LIU Gonghui^{1,2}, ZHANG Tao³, XU Xiaofeng⁴

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 3. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing, 100101, China; 4. Drilling and Production Research Institute, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei, 063000, China)

Abstract: The performance of relevant theoretical models combined with surface mud logging parameters has unfavorable accuracy in analyzing the motion characteristics and abnormal conditions of BHA. Based on the fast Fourier transform theory and the PDC bit teeth force bearing equation, one analytical method was established for modeling the motion characteristics of BHA and according to the one-dimensional unsteady flow theory and the acceleration theory, one analytical method for bottom hole abnormal conditions was set up. The theoretical analytical results aligned well with the field test data. As shown by the theoretical analysis and the measured results, in the measuring interval, there was a dominant frequency, whose rotating frequency was the same as that of PDM in the spectrograms of engineering parameters during sliding drilling. While during rotary drilling, there were two dominant frequencies present in the spectrograms of engineering parameters, whose rotating frequencies were equal to those of PDM and drill string respectively. In case of the drilling tools bouncing on the bottom, the time of the first casing pressure peak was twice that of the first annulus pressure valley, and the torque and vibration sensor readings changed dramatically. The research demonstrated that the dominant frequency characteristics of the bottom hole engineering parameter spectrograms could be used to distinguish the sliding drilling and the rotary drilling. Meanwhile, the rotation status of BHA and PDM could be obtained. The downhole abnormal conditions could be judged based on variations of casing pressure, annulus pressure, torque and acceleration sensor readings. This analysis method could provide a theoretical reference for safe and rapid drilling and the establishment of a downhole expertise system.

Key words: bottom hole assembly; motion characteristics; abnormal condition; analytical method

随着油气勘探开发的不断深入,利用传统综合录井手段来指导地面转速与钻压的调整越来越难以满足现代钻井的需求。而利用近钻头井下工程参数测量工具可直接获取井下工程参数,进而分析井下钻具的运动特征并判断是否处于异常状态,从而合理地调整地面转速与钻压。因此,利用近钻头处实测工程参数准确分析井下钻具的运动特征并判断是

收稿日期: 2017-10-23; 改回日期: 2018-01-16。

作者简介: 王超(1991—),男,湖北公安人,2015年毕业于长江大学石油工程专业,在读博士研究生,主要从事油气井力学与控制方面的研究工作。E-mail: 1062139470@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“控压钻井测控理论及关键问题研究”(编号: 51334003)、国家自然科学基金重点项目“深水油气钻采井筒压力控制基础研究”(编号: 51734010)、国家科技重大专项“井下安全多测点识别与分析系统研究”(编号: 2016ZX05020-003)和国家自然科学基金项目“基于模型预测控制理论与状态机架构的控压钻井压力控制方法研究”(编号: 51374223)联合资助。

否处于异常状态,对于安全、高效钻井具有重要意义。刘清友等人^[1-2]建立了钻柱的横向振动及扭转振动理论模型并对其求解;韩加庚等人^[3]在比能优化技术的基础上,建立了一套根据地表数据实时识别并控制井下振动的方法;吴斌、滕学清和 M. W. Dykstra 等人^[4-6]分别基于井底实测三轴振动数据,研究了钻柱的振动特征;J. D. Macpherson 等人^[7]根据地面与井底的实测钻压、扭矩,研究了钻柱异常状态的判别方法,同时建立了相关预测模型。截至目前,现有分析方法主要是围绕单一的振动数据或钻压、扭矩开展的,在实际钻井过程中,还有其他工程参数(如井底环空压力、井底管内压力)也可以反映钻具的运动特征及异常状态,甚至更敏感。为此,笔者研究了钻具运动特征的变化以及进入异常状态时井底钻压、扭矩、三轴振动、管内压力及环空压力的时频变化规律,以期为安全快速钻井及井下专家系统的建立提供理论参考。

1 井底钻具运动特征分析模型的建立

井底钻具运动特征包括螺杆之上钻柱、螺杆转子及钻头的转速,根据这些特征量可以直接判定井底工况(滑动钻进、旋转钻进),进而实现工况自动识别以及判断螺杆是否正常运转。这些特征量由钻压、扭矩、X/Y 方向振动及井底环空压力等物理量的周期性体现,通过快速傅里叶变换,可以快速提取与之对应的频率。

为避免重复破碎岩石,PDC 钻头布齿时每颗齿只负责一个破坏圈,即钻头每转动一圈便形成一个破坏圈层,完成一个破岩过程,故 PDC 齿压入深度的变化周期等于钻头的旋转周期。

单个圆柱 PDC 齿以一定后倾角吃入岩石时,上部钻具施加给岩石的轴向力、切向力及驱动该 PDC 齿回转运动的扭矩为^[8-11]:

$$F_{1i} = E^* (\beta_1 k_1 d^2 + \beta_2 k_2 d \sqrt{A}) \quad (1)$$

$$F_{2i} = E^* f (\beta_1 k_1 d^2 + \beta_2 k_2 d \sqrt{A}) + Bcd \quad (2)$$

$$M_i = F_{2i} r_i \quad (3)$$

其中

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{11}{16} \frac{1}{\sin 2\theta} \quad (5)$$

$$\beta_1 = \cos \theta + f \sin \theta \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{1.015}{\sin \theta} \sqrt{\frac{1}{\pi}} \quad (7)$$

$$\beta_2 = \sin \theta + f \cos \theta \quad (8)$$

$$B = \frac{2}{n+1} \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

式中: F_{1i} 为第 i 个 PDC 齿施加给岩石的轴向力,N; F_{2i} 为第 i 个 PDC 齿施加给岩石的切向力,N; M_i 为驱动第 i 个 PDC 齿运动的扭矩,N·m; E 为岩石弹性模量,Pa; ν 为岩石泊松比; f 为摩擦系数; θ 为 PDC 齿切入角,(°); n 为应力分布系数,与切入角 θ 和 PDC 齿几何形状、尺寸有关; φ 为岩石内摩擦角,(°); c 为岩石内聚力,Pa; d 为 PDC 齿压入深度,m; A 为接触面积,m²; r_i 为第 i 个 PDC 齿到钻头中心的距离,m。

对于同一切削地层,切削角相同的条件下,式(1)和式(2)等号的右边项只与压入深度 d 有关。当 d 呈周期性变化时,轴向力 F_{1i} 、切向力 F_{2i} 及驱动该 PDC 齿回转运动的扭矩亦呈周期性变化。滑动钻进过程中,钻头只由螺杆转子带动旋转,此时压入深度的傅里叶级数展开式为^[12]:

$$d = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \sin(2\pi n f_0 t) + b_n \cos(2\pi n f_0 t)] \quad (10)$$

式中: a_0 、 a_n 和 b_n 为傅里叶系数; f_0 为钻头转动频率,也是螺杆钻具转子的转动频率,Hz。

为了方便研究轴向力及扭矩的频谱特性,对压入深度进行低通滤波,可得:

$$d = a_0 + a_1 \sin(2\pi f_0 t) + b_1 \cos(2\pi f_0 t) \quad (11)$$

由于轴向力及扭矩的表达式中均含有 d^2 项,故钻压与扭矩的频谱图中包含频率 f_0 和 $2f_0$ 。

将传动轴及钻头看成一个质点系,根据该质点系对其轴线的动量矩定理,可得^[13-14]:

$$M_{Bit} = \frac{1}{2\pi} \Delta p q \eta \quad (12)$$

式中: M_{Bit} 为地层施加给钻头的扭矩,N·m; q 为螺杆钻具每转排量,m³/r,它是一个结构参数,仅与线型和几何尺寸有关; Δp 为螺杆钻具进、出口压差,Pa; η 为螺杆钻具扭矩的输出效率。

因为螺杆钻具进、出口压差与扭矩有相同的变化周期,当压差变化时,产生不稳定流动,自螺杆处产生压力波动,并向管内及环空传播,故井底环空压力也有相同的变化周期,同时滑动钻进过程中由于螺杆以上测量工具不旋转,因此 X/Y 方向的振动不具有周期性。

旋转钻进过程中,钻头既由螺杆转子驱动,又由转盘或顶驱驱动,此时压入深度的傅里叶级数展开

式为：

$$d = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \sin(2\pi n f_0 t) + b_n \cos(2\pi n f_0 t)] + \sum_{n=1}^{+\infty} [c_n \sin(2\pi n f_1 t) + d_n \cos(2\pi n f_1 t)] \quad (13)$$

式中： c_n 和 d_n 为傅里叶系数； f_1 为转盘/顶驱转动频率, Hz。

同理, 对压入深度进行低通滤波, 可得:

$$d = a_0 + a_1 \sin(2\pi f_0 t) + b_1 \cos(2\pi f_0 t) + c_1 \sin(2\pi f_1 t) + d_1 \cos(2\pi f_1 t) \quad (14)$$

由于轴向力及扭矩的表达式中均含有 d^2 项, 故钻压与扭矩的频谱图中包含频率 f_0 , $2f_0$, f_1 和 $2f_1$ 。测量工具随上部钻柱一起旋转, 故 X/Y 方向的振动周期与测量工具的转动周期相同, 同时由于钻井液随钻柱旋转呈螺旋运动, 因此测得环空压力的变化周期与钻柱的转动周期相同。

综合以上分析, 利用快速傅里叶变换解释井底钻具运动特征的流程如图 1 所示。

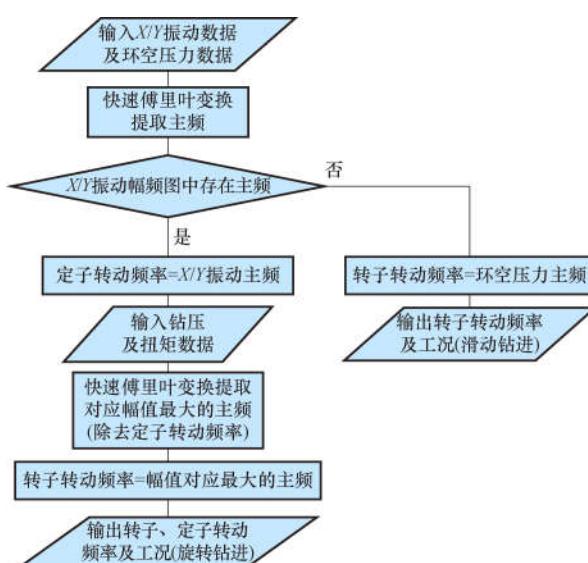


图 1 井底钻具运动特征解释流程

Fig. 1 Flow chart for interpretation of the motion characteristics of BHA

螺杆钻具常见的失效类型有传动轴折断、旁通阀刺漏、传动轴卡死、定子脱胶和螺纹脱扣^[15]。这几种失效形式对应不同的泵压响应, 而井下其他工况也可能导致类似的泵压响应。依据图 1 中提供的方法可以求出转子转速, 根据转子转速可以直观判断螺杆钻具是否失效, 上面几种失效类型对应的转子转速均减小。当判定是螺杆失效后, 再根据井底管内及环空压力的响应特征来判别具体是哪种故

障, 避免误判事件的发生, 以避免因不必要的起钻更换钻具而延长钻井周期。

2 井底异常状态分析模型及方法

井底突发异常时, 通常会引发不稳定流动, 即流体压力发生波动, 同时管柱的振动状态也会发生变化, 根据管内压力传感器、环空压力传感器及 X/Y 方向振动传感器读数的波动特征可以判断故障源, 从而快速解除故障。

利用特征线法求解不稳定流动拟线性双曲性偏微分方程组(见图 2), 其中 W 点为求节点, R 为过求节点的正向特征线与上一时层空间轴的交点, S 点为过求节点的负向特征线与上一时层空间轴的交点, 并将得出的两特征方程沿各自的特征线积分, 得到差分方程^[16-18]:

$$p_{WR} - p_R + \frac{\rho_R C_R}{A_R} (Q_W - Q_R) + C_R p_{fR} \Delta t = 0 \quad (15)$$

$$- p_{WS} + p_S + \frac{\rho_S C_S}{A_S} (Q_W - Q_S) + C_S p_{fS} \Delta t = 0 \quad (16)$$

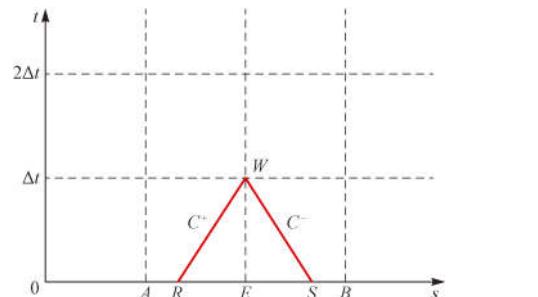


图 2 特征线示意

Fig. 2 Diagram of characteristic lines

式中: p_{WR} 为利用正向特征线求得节点 W 的压力, Pa; p_{WS} 为利用负向特征线求得节点 W 的压力, Pa; p_R 为 R 点的压力, Pa; p_S 为 S 点的压力, Pa; p_{fS} 为 S 点的压耗, Pa; p_{fR} 为 R 点的压耗, Pa; ρ_R 为 R 点的流体密度, kg/m^3 ; ρ_S 为 S 点的流体密度, kg/m^3 ; C_R 为 R 点的压力波波速, m/s ; C_S 为 S 点的压力波波速, m/s ; A_R 为 R 点的面积, m^2 ; A_S 为 S 点的面积, m^2 ; Q_W 为 W 点的流量, m^3/s ; Q_R 为 R 点的流量, m^3/s ; Q_S 为 S 点的流量, m^3/s ; Δt 为时间步长, s。

当节点 W 为井底时, 由于存在螺杆压耗及钻头压耗, 则节点 W 的压力为:

$$p_{WR} = p_{WS} + \Delta p_1 (Q_W) + \Delta p_2 (Q_W) \quad (17)$$

求得 Q_W 为:

$$Q_W = \frac{p_R - p_S + \frac{\rho_R C_R}{A_R} Q_R + \frac{\rho_S C_S}{A_S} Q_S}{\frac{\rho_S C_S}{A_S} + \frac{\rho_R C_R}{A_R}} - \frac{C_S p_{fs} \Delta t + C_R p_{fr} \Delta t + \Delta p_1 + \Delta p_2}{\frac{\rho_S C_S}{A_S} + \frac{\rho_R C_R}{A_R}} \quad (18)$$

式中: Δp_1 为螺杆钻具压耗, Pa; Δp_2 为钻头压耗, Pa。

由式(15)、(16)、(18)与(12)可知, 当施加钻压变化时, 井内产生不稳定流动, 此时井底各参数的瞬态变化规律为: 地面施加钻压增大, 则井底钻

压、井底扭矩、螺杆压耗、井底管内压力增大, 而环空压力减小; 地面施加钻压减小, 则井底钻压、井底扭矩、螺杆压耗、井底管内压力减小, 而环空压力增大。

立管处与井底是恒流量边界, 当压力波传至这 2 处时会产生等大的正反射, 而环空出口是恒压边界, 当压力波传至环空出口时会产生等大的负反射, 故井底激发不稳定流动时, 压力波在井内会在 2 个方向上传递与转化(见图 3)。图 3 中, 井深为 L , m; 压力波传播速度为 c , m/s。

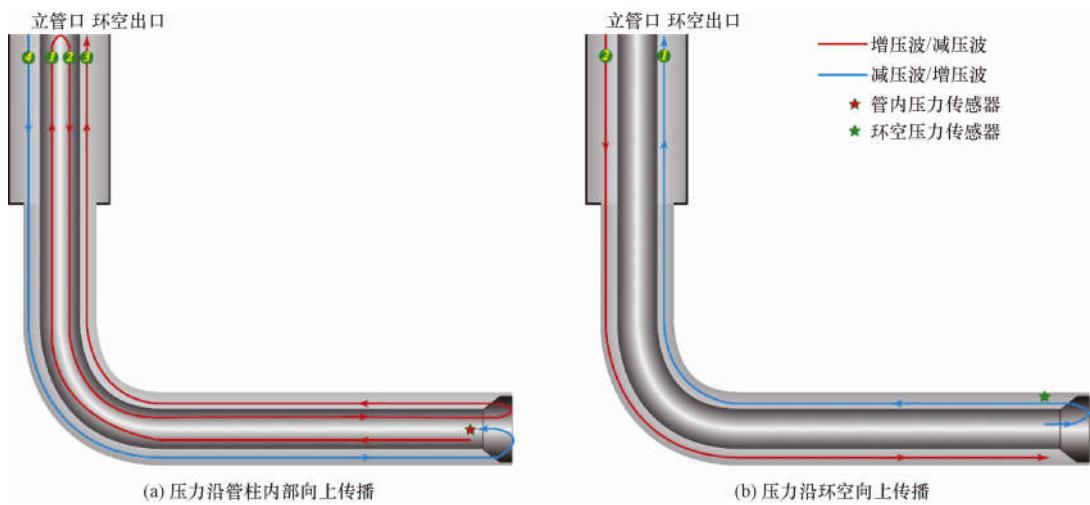


图 3 压力波双向传递与转化示意图

Fig. 3 Diagram of pressure wave two-way transmission and transformation

图 3 中井底管内压力传感器从感应到增压波/减压波至感应到减压波/增压波所经历的时间是 $4L/c$, 井底环空压力传感器从感应到减压波/增压波至感应到增压波/减压波所经历的时间是 $2L/c$, 即井底管内压力传感器出现第一个压力峰值/谷值的时间, 是井底环空压力传感器出现第一个压力谷值/峰值的时间的 2 倍。

近钻头井下工程参数测量工具的三轴振动传感器安放在中心探管上^[19-20], 当钻压施加不合理导致出现不稳定流动时, 钻具的运动状态也会相应改变, 可能导致横向振动和涡动, 钻具在井眼中偏离井眼轴线运动, 如图 4 所示。图 4 中, a_M 为 M 方向横向振动加速度; m/s^2 ; a_N 为 N 方向横向振动加速度; m/s^2 ; a_r 为涡动向心加速度; m/s^2 ; a_θ 为涡动切向加速度; m/s^2 ; a_Y 为 Y 方向传感器测得的加速度; m/s^2 ; a_X 为 X 方向传感器测得的加速度; m/s^2 。

a_Y 与 a_X 是横向振动与涡动在 X、Y 方向的合成, 直接反映了横向振动与涡动的特征, a_Y 与 a_X 的合加速度为:

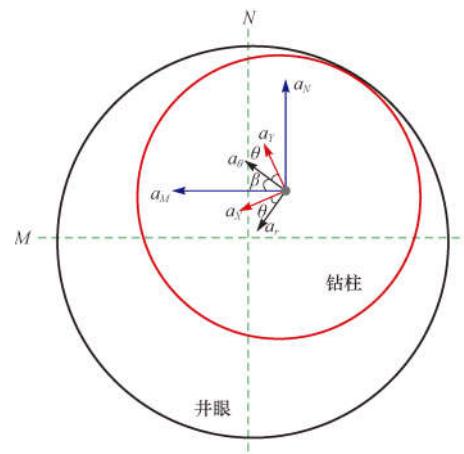


图 4 钻柱偏离井眼轴线运动示意

Fig. 4 Diagram of eccentric motion of drill string

$$a = \sqrt{a_Y^2 + a_X^2} = \sqrt{a_\theta^2 + a_r^2 + a_M^2 + a_N^2 + 2\sqrt{(a_\theta^2 + a_r^2)(a_M^2 + a_N^2)}\sin(\beta + \varphi)} \quad (19)$$

$$\text{其中 } \tan \varphi = \frac{a_\theta a_M - a_r a_N}{a_\theta a_N + a_r a_M} \quad (20)$$

式中: β 为 a_θ 方向与 a_M 方向间的角度, (°)。

由式(19)可知, 一旦产生横向振动或涡动, 合加速度便会增大。钻进过程中当施加的钻压产生突变时通常会导致产生粘滑振动, 同时伴生横向振动或涡动^[21-23]。当井底钻具处于静止状态时, 合加速度最小。

3 实例分析

冀东油田某井三开造斜段采用的底部钻具组合为 $\phi 215.9$ mm PDC 钻头 $\times 0.32$ m $+$ $\phi 172.0$ mm 螺杆 $\times 8.15$ m $+$ $\phi 208.0$ mm 螺杆稳定器 $\times 0.78$ m $+$ $\phi 203.0$ mm 浮阀 $\times 0.62$ m $+$ $\phi 177.8$ mm 无磁钻铤 \times

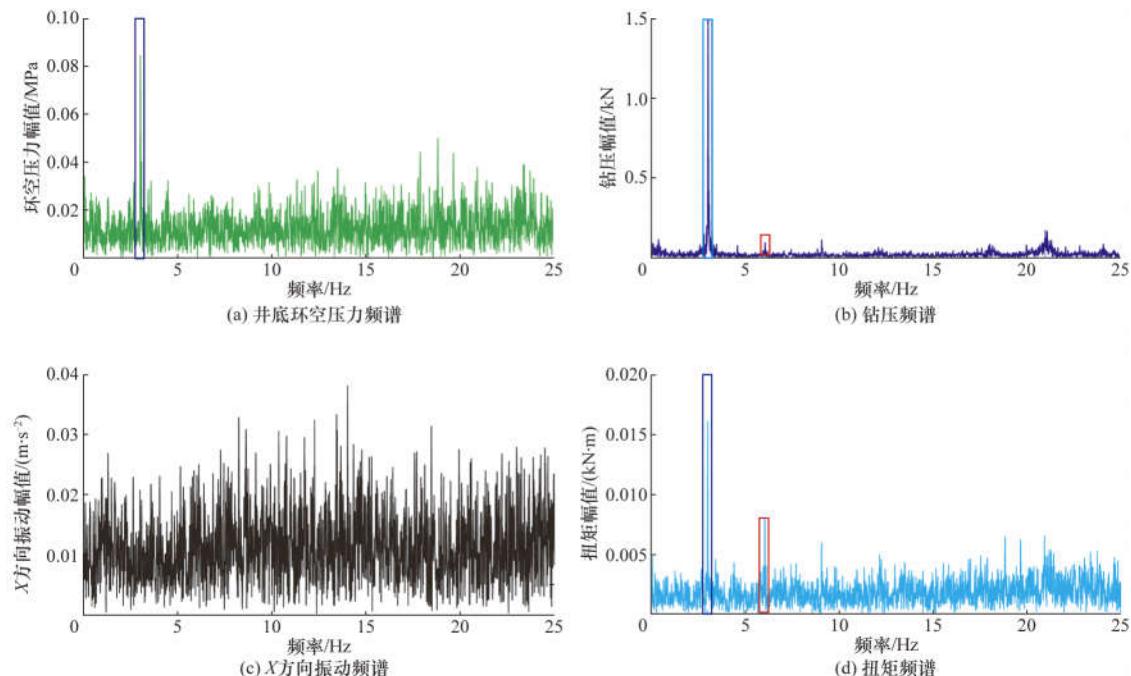


图 5 滑动钻进过程中井底工程参数频谱图

Fig. 5 Spectrogram of bottom hole engineering parameters during sliding drilling

由图 5 中的环空压力与 X 方向振动的频谱图可看出, 环空压力频谱图中存在 3 Hz 的主频, 而 X 方向振动频谱图中不存在主频, 根据图 1 中的判别流程判断现阶段正处于滑动钻进阶段, 钻头由螺杆转子驱动旋转破岩, 这与实际工况相符。同时在钻压与扭矩频谱图中发现, 存在 3 和 6 Hz 的频率响应, 这与频谱图中存在频率 f_1 和 $2f_1$ 响应的结论相吻合, 在这个过程中螺杆转子的转速为 3 rad/s。

3.1.2 旋转钻进过程

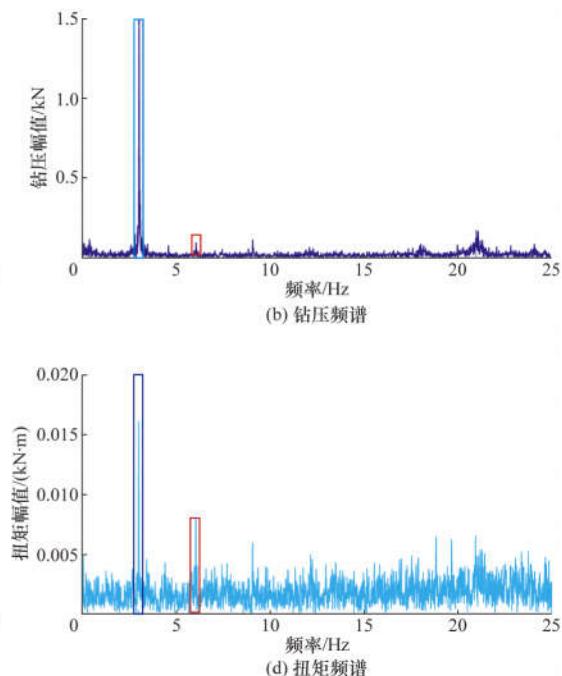
旋转钻进时, 近钻头井下工程参数测量工具测

9.15 m $+$ MWD 短节 $\times 2.19$ m $+$ 近钻头测量短节 \times 3.07 m。近钻头井下工程参数测量工具的数据采样频率是 50 Hz, 所钻井段为 2 049.00 \sim 2 576.00 m, 对该趟钻钻进过程中的滑动钻进及旋转钻进采用上述分析方法进行验证。

3.1 井底钻具运动特征分析

3.1.1 滑动钻进过程

滑动钻进时, 近钻头井下工程参数测量工具测得部分钻压、扭矩、X 方向振动和环空力数据, 对测得的数据进行快速傅里叶变换, 变换得到的频谱图如图 5 所示。



得部分钻压、扭矩、X 方向振动和环空压力等数据, 对测得的数据进行快速傅里叶变换, 变换得到的频谱图如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 环空压力与 X 方向振动的频谱图中都存在 0.8 Hz 的主频, 根据图 1 中的判别流程判断现阶段正处于旋转钻进阶段, 钻头由螺杆转子及转盘/顶驱共同驱动旋转破岩, 这与实际工况相符。从钻压与扭矩的频谱图中提取前 2 位幅值的主频分别为 0.8 和 2.9 Hz, 其中 0.8 Hz 为螺杆定子随上部钻柱转动的频率, 2.9 Hz 为螺杆转子的转动频率。

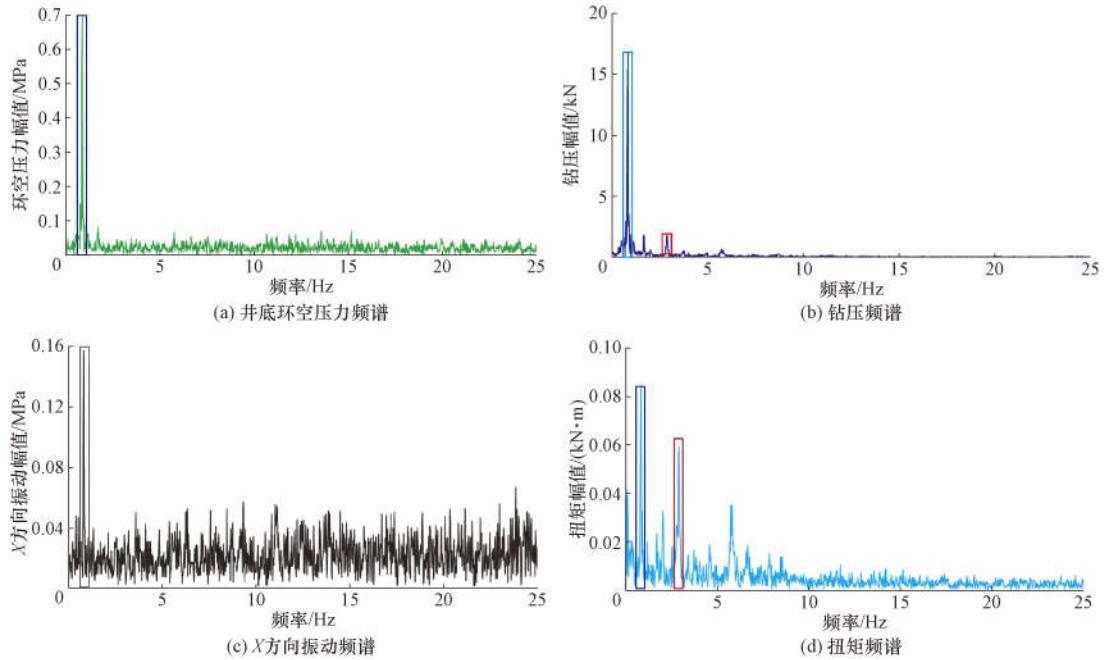


图 6 旋转钻进过程中井底工程参数频谱图

Fig. 6 Spectrogram of bottom hole engineering parameters during rotary drilling

3.2 井底异常状态分析

滑动钻进(定向)过程中,井口施加的钻压一般高于旋转钻进中施加的钻压,司钻一般根据指重表控制钻压,由于指重表所示钻压与真实井底钻压不相等(尤其是在大斜度井或水平井中),在实际钻井

过程中经常会出现钻压施加不合理导致螺杆转子制动的现象,严重影响螺杆的使用寿命^[24]。某时刻定向时立管压力突然升高,司钻发现后及时解除,在异常出现和解除过程中近钻头井下工程参数测量工具测得的部分结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出, t_1 时刻钻压传感器读数突然

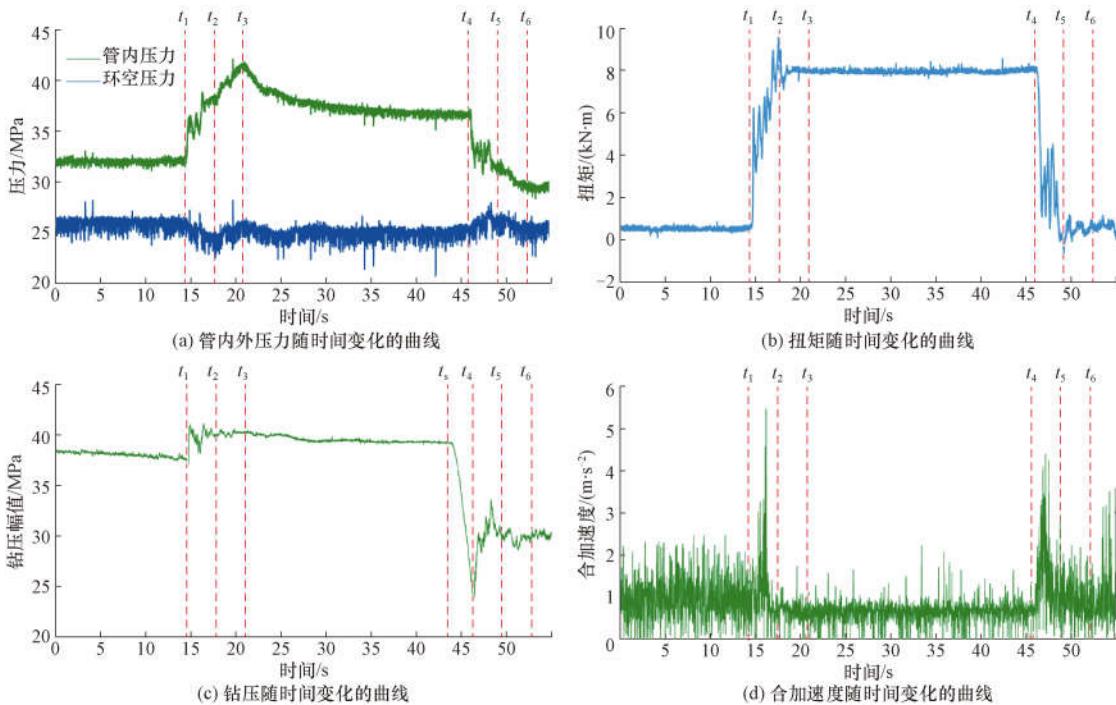


图 7 井底出现异常并解除过程中部分测量结果

Fig. 7 Some measuring results for bottom hole abnormal conditions and their solving process

变大,说明地面施加钻压增大,井底钻头所受扭矩随之增大,由式(12)可知,螺杆钻具压耗也会立即增加,于是井筒内产生不稳定流动,井底管内产生增压波向立管传播,管内压力传感器读数变大,井底环空产生减压波向环空出口传播,环空压力传感器读数变小。同时井底原先的动量矩平衡方程不再成立,井底产生粘滑振动,并伴生横向振动或涡动,由式(19)可知,钻头井下工程参数测量工具所测合加速度也会增大。

从激发不稳定流动开始至管内压力传感器达到峰值的时间为 $t_3 - t_1$,至环空压力传感器达到谷值的时间为 $t_2 - t_1$,且 $t_3 - t_1 \approx 2(t_2 - t_1)$ 。设当前井深为 L ,从图 4 可以得出,管内测点从激发增压波开始至第一个减压波传至此处,压力波传播的路程是 $4L$,而环空测点从激发减压波开始至第一个增压波传至此处,压力波传播的路程为 $2L$,当环空不含气时压力波在管内和环空的传播速度近似相等,故有 $t_3 - t_1 \approx 2(t_2 - t_1)$ 。在 t_4 至 t_6 解除异常的过程中,也有相同的规律 $t_6 - t_4 \approx 2(t_5 - t_4)$,进一步验证了该解释方法的正确性。

从图 7(d)可以看出, t_2 时刻合加速度最小,说明此时施加的钻压使底部钻具组合进入制动状态, t_3 至 t_4 时刻底部钻具组合处于静止状态,在这个过程中螺杆转子始终处于阻卡状态,螺杆输出扭矩不变,在钻头扭矩的束缚下其输出扭矩不足以使其转动。 t_5 时刻司钻开始通过上提钻具解除井底的制动状态,当钻压降至一定值时螺杆输出扭矩大于钻头处的扭矩, t_6 时刻螺杆转子突然开始转动,产生粘滑振动并伴生横向振动或涡动,此时所测合加速度也增大,同时井内产生不稳定流动,管内压力传感器与环空压力传感器读数的变化规律也与理论分析相吻合。

4 结 论

1) 利用所建立的近钻头井下钻具运动特征及突发异常分析方法,解释近钻头井下工程参数测量工具所测数据,解释结果与实际工况相符。

2) 对井底所测的钻压、扭矩、外压及 X 方向振动进行快速傅里叶变换,可以判断当前井底的钻进状态,还可以获取钻柱、螺杆转子的转动频率,判断螺杆是否处于正常工作状态。

3) 钻井过程中若井底管内压力升高,环空压力降低,且管内压力出现第一个峰值的时间是环空压力出现第一个谷值时间的 2 倍,则可判定井下钻具

运动受阻,应及时采取相关解阻措施。

参 考 文 献

References

- [1] 刘清友,黄本生.牙轮钻头横向振动模型的建立及求解[J].天然气工业,2001,21(4):55-56.
LIU Qingyou, HUANG Bensheng. Establishment of lateral vibration dynamic model of roller cone rock bit and its solution [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 55-56.
- [2] 刘清友,马德坤,钟青.钻柱扭转振动模型的建立及求解[J].石油学报,2000,21(2):78-82.
LIU Qingyou, MA Dekun, ZHONG Qing. A drilling string torsional vibration model and its solution [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 78-82.
- [3] 韩加庚,汪海阁,林羽翔,等.基于地表数据的井下振动识别与控制[J].石油钻采工艺,2016,38(2):144-150.
HAN Jiageng, WANG Haige, LIN Yuexiang, et al. Identification and control of downhole vibration based on surface data [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2): 144-150.
- [4] 吴斌,吴丰,李建龙,等.随钻振动和冲击参数监测在钻井过程中的应用[J].断块油气田,2015,22(1):113-115.
WU Bin, WU Feng, LI Jianlong, et al. Application of vibration and shock parameter monitoring while drilling in drilling process [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(1): 113-115.
- [5] 滕学清,狄勤丰,李宁,等.超深井钻柱粘滑振动特征的测量与分析[J].石油钻探技术,2017,45(2):32-39.
TENG Xueqing, DI Qinfeng, LI Ning, et al. Measurement and analysis of stick-slip characteristics of drill string in ultra-deep wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 32-39.
- [6] DYKSTRA M W, CHEN D C-K, WARREN T M, et al. Experimental evaluations of drill bit and drill string dynamics [R]. SPE 28323, 1994.
- [7] MACPHERSON J D, JOGI P, KINGMAN J E, et al. Application and analysis of simultaneous near bit and surface dynamics measurements [R]. SPE 39397, 1998.
- [8] 李田军. PDC 钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2012.
LI Tianjun. Mechanical analysis and fragmentation mechanism of PDC bits drilling rock [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2012.
- [9] 田家林,刘刚,杨琳,等.增强造斜易控性的新型 PDC 钻头工作特性[J].石油学报,2015,36(7):882-889.
TIAN Jialin, LIU Gang, YANG Lin, et al. Characteristic of new-style PDC bit with whipstocking controllability [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 882-889.
- [10] KOVALYSHEN Y. A simple model of bit whirl for deep drilling applications [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(24):6321-6334.
- [11] PERNEDER L, DETOURNAY E, DOWNTON G. Bit/rock

- interface laws in directional drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2012, 51: 81-90.
- [12] 程乾生. 数字信号处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 29-90.
- CHENG Qiansheng. Digital signal processing [M]. Beijing: Peking University Press, 2012: 29-90.
- [13] 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 11-40.
- SU Yinao. Research and application of screw drilling tools [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 11-40.
- [14] 谭春飞. 深井超深井涡轮钻具复合钻井提高钻速技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- TAN Chunfei. The ROP technical research on turbo-drill composite drilling in deep & ultra-deep well[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [15] 左运峰, 周文华, 檀惊涛, 等. 降低螺杆钻具失效的现场技术措施[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(增刊 2): 36-38.
- ZUO Yunfeng, ZHOU Wenhua, TAN Jingtao, et al. Technical field measures to reduce screwdrill failure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(supplement 2): 36-38.
- [16] 樊洪海. 实用钻井流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 302-320.
- FAN Honghai. Practical drilling fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 302-320.
- [17] 孔祥伟, 林元华, 邱伊婕, 等. 钻井泥浆泵失控/重载引发的波动压力[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 114-119.
- KONG Xiangwei, LIN Yuanhua, QIU Yijie, et al. Fluctuating pressure caused by runaway/overload of mud pump in drilling operations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 114-119.
- [18] BACON W A. Consideration of compressibility effects for applied-back-pressure dynamic well control response to a gas kick in managed pressure drilling operations[D]. Arlington: University of Texas, 2011.
- [19] 刘伟, 周英操, 王瑛, 等. 井下振动测量、分析原理研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(1): 14-18.
- LIU Wei, ZHOU Yingcao, WANG Ying, et al. Study on downhole vibration measurement and analysis theory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(1): 14-18.
- [20] 狄勤丰, 平俊超, 李宁, 等. 钻柱振动信息测量技术研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 37(5): 565-579.
- DI Qinfeng, PING Junchao, LI Ning, et al. Progress in measurement technology for drill string vibration[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(5): 565-579.
- [21] 高德利, 高宝奎, 耿瑞平. 钻柱涡动特性分析[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(6): 9-13.
- GAO Deli, GAO Baokui, GENG Ruiping. Analysis of drill-string whirling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(6): 9-13.
- [22] 王珍应, 林建, 施太和, 等. 钻柱振动特性分析与井底岩性识别方法初探[J]. 钻采工艺, 2000, 23(6): 1-3.
- WANG Zhenying, LIN Jian, SHI Taihe, et al. Analysis of vibration property for drilling string and discussion on recognition method of bottomhole lithology[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(6): 1-(3.)
- [23] DUNAYEVSKY V A, ABBASSIAN F, JUDZIS A. Dynamic stability of drillstrings under fluctuating weight on bit[J]. SPE Drilling & Completion, 1993, 8(2): 84-92.
- [24] 苏义脑. 水平井螺杆钻具的受力特征[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(1): 6-15.
- SU Yinao. Characteristic of force applied on positive displacement drill in horizontal drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21(1): 6-15.

〔编辑 滕春鸣〕