

# 井下振动控制技术研究

刘 伟 周英操 王先国

(中国石油 钻井工程技术研究院,北京 100195)

**摘 要:**为了获得高的油气钻井投资回报率,必须保证钻井过程安全、快速,以达到减少钻井事故、降低工程成本 and 尽早获取收益的目的,因此加强钻井过程控制十分必要。井下振动控制技术是保证安全快速钻井的关键技术之一,但是,目前该技术还不够成熟,特别是还未对钻井过程中发生的振动现象进行系统的分析,不能合理、准确地控制钻柱的振动状态和振动强度,以致可能造成能量大量损耗,甚至损坏钻具,无法实现安全、快速钻进。系统分析了振动现象的影响因素,包括:钻头、钻柱系统结构(特别是井底钻具组合,包括钻头类型)、钻井参数(钻压和转速)、已钻井眼几何参数和地层性质等,结合对钻柱固有频率的分析提出了井下振动控制的方法和程序,以最大限度地减小振动的危害,尽可能地提高钻井速度、缩短钻井周期、提高投资回报率。

**关键词:**钻井; 钻柱振动; 振动控制; 钻压; 转速; 钻井速度

**中图分类号:**TE242.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)06-0042-06

## Study on Downhole Vibration Control Technology

Liu Wei Zhou Yingcao Wang Xianguo

(Drilling Engineering & Technology Research Institute, CNPC, Beijing, 100195, China)

**Abstract:** In order to achieve a high return on investment in oil and gas drilling, we have to ensure the drilling process is safe and fast for the purpose of reducing drilling accidents and project costs, and benefiting as soon as possible. Therefore, enhancing drilling control is very important. Downhole vibration control is one of the key technologies for fast and safe drilling. Currently this technology is not mature, especially the vibration phenomenon of drilling operation was not analyzed systematically. The vibration of the drill string and the vibration strength can not be controlled reasonably and accurately. All these result in waste of energy, even damage the drilling string. Consequently, the safe and fast drilling is almost impossible. After systematic analysis of various factors, such as the structure of drill bit and drilling string system (bottom hole assembly, bit type), drilling parameters (bit weight, rotary speed), geometry of drilled trajectory and formation character, combining with analysis of natural frequency of drilling string, vibration control method and procedure are established which can reduce the harm of severe vibration effectively, achieve higher rate of penetration, shorten drilling period and increase return rate.

**Key words:** drilling; drilling string vibration; vibration control; bit weight; rotary speed; drilling speed

油气钻井中,为了获得高投资回报率,必须在保证钻井安全的前提下,尽量提高钻井速度,以缩短钻井周期,降低钻井成本。但是,保证钻井安全、提高钻井速度受到各种因素(如地质条件、钻井技术、钻井工具和过程控制技术等)的影响和制约。其中,钻井过程中钻柱会发生剧烈振动,使钻柱本体消耗大量能量,导致钻头破碎岩石的能量大大降低,并且还可能因振动而损坏钻柱上各部件,影响钻井速度和

安全。因此,为了安全、快速地钻井,必须要控制钻井过程中的振动。一般认为,有两种振动控制方法:

**收稿日期:**2009-09-23; **改回日期:**2010-10-29

**作者简介:**刘伟(1977—),男,安徽马鞍山人,2000年毕业于江汉石油学院石油工程专业,2004年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,2008年获中国石油勘探开发研究院油气井工程专业博士学位,工程师,现主要从事管柱力学、控压钻井技术研究。

**联系方式:**(010)52781745, liuweidri@cnpc.com.cn

一是研制专门的减振工具和振动监测工具<sup>[1]</sup>;另一方法是在研究振动机制和优化钻井参数的基础上,应用井下振动控制技术进行振动控制。井下振动控制技术是在钻井实践中积累的经验技术,但是,目前该技术还不够成熟,特别是还未对钻井过程中发生的振动现象进行系统分析,尚难有效、合理地控制井下振动现象,因此,亟待加强井下振动控制技术的研究。

## 1 机理分析

井下振动机理十分复杂,影响钻井过程中井下振动的因素有很多,主要有钻柱系统结构(特别是井底钻具组合,包括钻头类型)、钻井参数(主要为钻压和转速)、已钻井眼几何参数和地层性质。

### 1.1 钻头、钻柱系统结构

钻头、钻柱系统结构是影响其固有频率的主要因素。如果能合理地确定钻头、钻柱系统的结构,振动控制就变得相对简单。

#### 1.1.1 钻杆段和钻铤段的长度

钻柱振动的模式有轴向振动、横向振动和扭转振动 3 种,如图 1 所示。

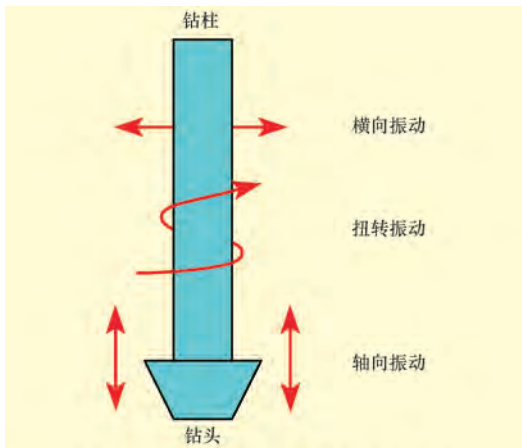


图1 钻柱振动的三种基本振动模式

Fig.1 Three basic vibration modes of drill string

钻杆段和钻铤段的长度与钻杆段、钻铤段抗弯刚度的比,对轴向振动和扭转振动的固有频率影响很大<sup>[2]</sup>。钻井过程中,钻柱长度随着井深增加不断增长,但只是钻杆部分增长,钻铤段的长度保持不变,如图 2 所示。

在井深比较浅时,钻铤段的相对长度比较长,且由于钻铤的横截面积比钻杆要大很多,所以轴向振

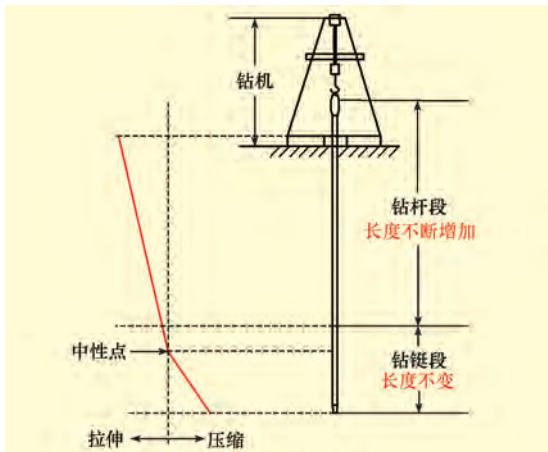


图2 钻杆和钻铤示意

Fig.2 Drill pipe and drill collar schematic diagram

动的固有频率主要受钻铤段影响,随着井深不断加大,钻杆段不断加长,轴向振动固有频率则主要受钻杆段影响。扭转振动的第一阶固有频率,随着井深加大,趋近于将钻杆转动惯量的 1/3 加上钻铤转动惯量后钻柱系统的扭转频率。不论轴向振动还是扭转振动,其固有频率都随着井深的加深而迅速下降。

#### 1.1.2 稳定器

稳定器的安放位置对底部钻具组合的力学分析影响很大。根据稳定器的不同安放位置,可以将钻具组合分为三类:降斜钻具组合、增斜钻具组合和稳斜钻具组合。稳定器的安放位置对钻具组合横向振动固有频率的影响也很大。

降斜钻具组合紧接钻头的是一段长钻铤,然后是一个稳定器;增斜钻具组合为一个近钻头稳定器,然后是一段长钻铤;稳斜钻具组合中有一个近钻头稳定器,然后是一段较短的钻铤。由文献[3]可知:降斜钻具组合第一跨和增斜钻具组合第二跨都易于发生强烈的横向振动,稳斜钻具组合的横向振动最弱。

另外需要注意的是:使用欠尺寸稳定器,及由于井眼扩径造成的稳定器与井壁之间的间隙,对横向振动的影响很大,即使在井下动力钻具钻井模式下,也可能在钻头高转速和钻压不平稳的情况下,发生稳定器与井壁剧烈碰撞事故。这是因为,当钻柱旋转时,一方面由于涡动造成钻柱特别是稳定器与井壁的碰撞,另一方面由于钻压波动引起的横向振动也会造成钻柱本体或稳定器与井壁的碰撞,两者综合使稳定器与井壁之间碰撞将更为激烈。对于 MWD 等精密井下仪器所在的钻铤一定要尽量保持较高的刚度,缩短长度,特别是两端一定安装满眼稳定器以减少横向振动的危害。

### 1.1.3 钻头

钻头是主要振动源。钻头主要有三种破岩方式:切削、剪切;凿碎;凿碎、剪切。经常使用的三牙轮钻头属于凿碎型钻头,牙轮在井底的滚动造成单双齿交错进行,使牙轮重心不断上下变化,而且在钻头作用下形成凹凸的三脊背形状井底,这些都使钻头作沿轴向的上下运动,从而激发钻柱的轴向振动。PDC 钻头属于切削、剪切型钻头:一方面由于 PDC 钻头受到的扭矩与钻压、转速呈非线性关系,在低转速时,随着转速的增大,钻头处扭矩迅速增大,超过某一门限转速,钻头才开始转动,扭矩会突然下降,这种现象可能会引起扭转振动中的不稳定,钻头可能获得超过 3 倍钻柱转速的转速,导致在某一钻柱转速区间有钻头粘滑现象出现;另一方面,PDC 钻头切削角过大,切削齿吃入岩石过深,齿数过密,都会造成钻头瞬时制动;除此而外,PDC 钻头还可能由于瞬时旋转中心发生不稳定移动导致的钻头涡动问题,这可能引起钻柱的振动或者涡动,导致钻具疲劳损坏。目前消除 PDC 钻头涡动最有效的方法就是使用低摩阻保径钻头。

### 1.2 已钻井眼几何参数

**井斜角** 井斜角对跳钻、横向碰撞和粘滑都有一定的影响。钻直井时很容易发生跳钻,随着井斜角的增大,出现粘滑现象的概率也在增大。随着井斜角的增大,横向振动的幅度降低,与井壁碰撞的概率也在降低<sup>[3]</sup>。

**井眼曲率** 井眼曲率对涡动的影响很大,曲率半径越小,钻柱向前涡动变为向后涡动的可能性越小。另外,井眼曲率对横向振动的传播也有一定的影响,弯曲井段越长,横向振动传播距离越长,在斜直井段横向振动衰减速度最快<sup>[3]</sup>。

### 1.3 地层性质

影响钻头、钻柱系统振动的地层性质主要有地层的硬度和地层的软硬交错程度<sup>[4]</sup>。地层性质对钻头、钻柱系统振动的影响是通过钻头与地层相互作用来实现的。钻井实践经验表明:在坚硬和研磨性强的地层,如石灰岩或者砂岩地层,经常发生剧烈的轴向振动,如果使用三牙轮钻头则可能发生跳钻现象;在软地层向硬地层钻进时,如果不及时调整转速,则可能激发强烈的横向振动,甚至碰撞。

## 2 钻井参数

在完成井底钻具组合配置后,将钻柱下入井底后,控制钻头和钻柱系统振动最直接、最有效的方式就是对钻压和转速的控制。文献[3]对不同振动形式进行了分析,得出了某一特定钻柱配置下各种形式的固有频率,然后根据施工工艺要求(主要是钻头类型和钻速的要求)和固有频率分布,优选转速和确定钻压。

### 2.1 钻压

钻压对降斜和增斜钻具组合的横向振动影响很大,但对稳斜钻具组合影响不大。钻压增大钻速也会增大,并在一定程度上抑制钻柱的轴向振动,但是也会使钻柱的弯曲程度增大,与井壁接触长度增大,从而增大发生向后涡动的可能性,而且增大钻压也会增大引发粘滑现象的概率。

### 2.2 转速

增大转速在一定程度上可以减弱粘滑,甚至消除粘滑现象,但是如果控制不当,则可能引起剧烈的轴向振动,甚至是跳钻。而且,增大转速也增大了钻柱的惯性离心力,钻柱形成涡动的可能性便大大增加,如果此时增大钻压,使钻柱更弯曲,则钻柱就会向后涡动发展,如果减小钻压,钻柱就会向前涡动发展。

根据以上分析及前人试验的结论<sup>[5]</sup>,可以确定稳定钻井、粘滑、向前涡动和向后涡动之间的影响关系,如图 3 所示。

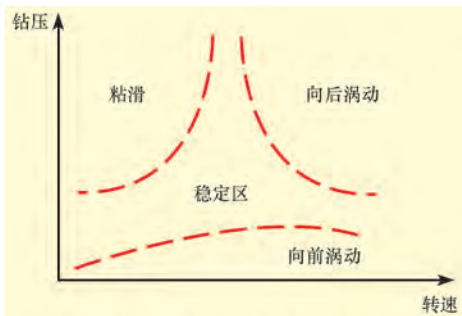


图3 钻压、转速的异常振动的关系  
Fig.3 Relationships among WOB, ROB and abnormal vibration

## 3 固有频率分析

钻柱振动模式包括轴向振动、横向振动和扭转

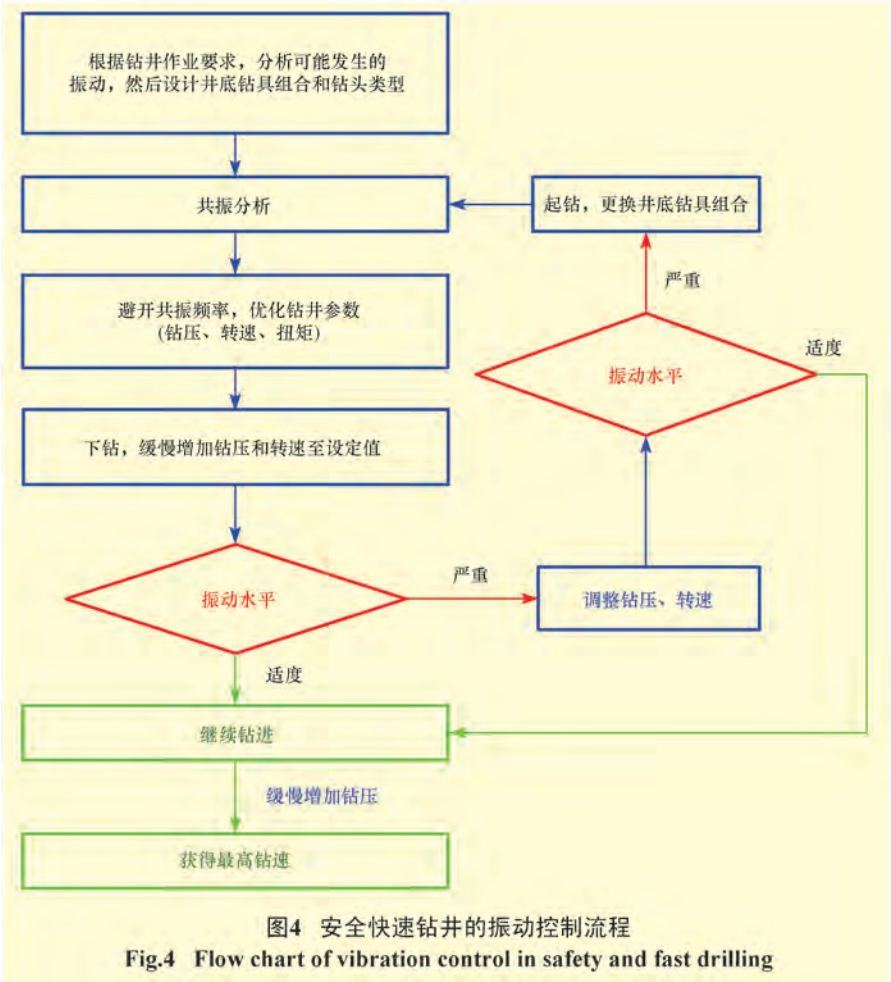
振动,对应的固有频率也有三种,分别为轴向振动固有频率、横向振动固有频率和扭转振动固有频率。但是,钻柱的固有频率受多种因素影响,如:钻柱内外钻井液、钻柱空间形态、钻柱结构、温度和钻柱运动等。而且各种振动模式可能还会发生耦合,从而使情况更为复杂,甚至不可解。因此,实现井下振动控制比较可行的方法是根据可能发生异常振动模式建立相对适用的模型进行求解,例如:对于跳钻、横向冲击和粘滑三种异常振动模式可以分别建立三种振动模式的固有频率分析模型进行求解,使用的方法包括微分方程法、特征值法、传递矩阵法和有限元法,其中微分方程法最简单,有限元法最复杂。

对于轴向振动固有频率,钻柱空间形态影响比较大,如果是直井,使用微分方程法<sup>[6]</sup>已经可以满足要求,如果是斜井眼,则需要根据斜井眼中的钻柱轴向振动采用有限元法<sup>[7]</sup>进行计算;对于横向振动固

有频率,由于横向冲击发生在两个接头或者稳定器之间的钻柱上,所以建立考虑钻井液影响的微分方程<sup>[8]</sup>即可进行计算;对于扭转振动固有频率,若认为钻柱旋转角速度为常量,则可视扭转振动为一维振动,使用微分方程<sup>[9]</sup>可求解固有频率。

#### 4 振动控制程序

因为钻井过程中振动是不可避免的,实际钻井作业的目标是将振动控制在一个合适的水平,尽量减少能量损失,然后通过多种方法和技术提高钻速,减少时间损失。振动控制是保证安全快速钻井的关键。显然,硬件是进行振动控制的一个很重要的方面,但是,振动控制的方法和程序比硬件需求更高,它是振动控制的核心,建立在机理研究和工作经验的基础之上的。详细的振动控制过程如图 4 所示。



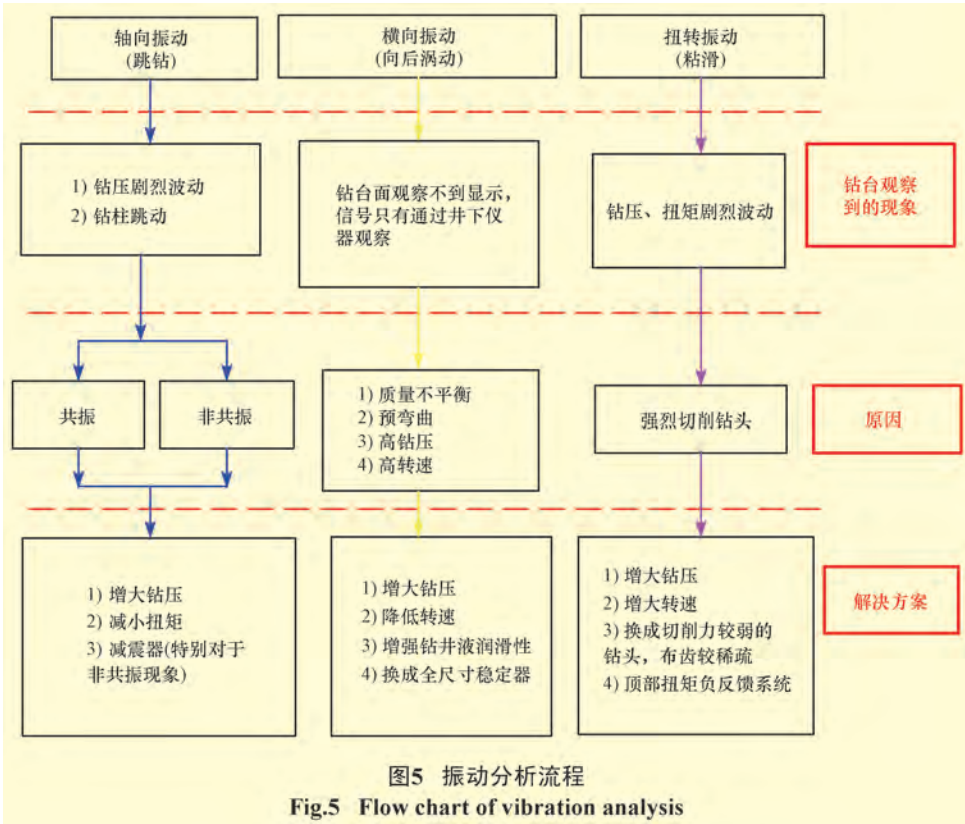
为了控制振动水平,必须严格执行振动控制流程,关键是实时监视钻柱振动的发生和发展。不论

是否使用了精密硬件从井底或者钻台进行监视,钻井人员使用眼睛在钻台监视振动也是必须的,并且



是最直接、有效的方法。因此,当发生剧烈振动时,第一步是从钻台观察钻柱动态,第二步是分析其具

体原因,第三步是找出控制振动水平的方法,详细程序如图 5 所示。



根据图 4、图 5 所示流程,通过振动控制可以避免钻井过程中的许多异常振动,减少能量损失,提高机械钻速,可为安全快速钻井提供最大可能的技术支持。

## 5 实例分析

隆 9 井<sup>[10]</sup>是位于酒泉盆地青西凹陷窟窿山逆冲断裂带窟窿山构造南翼上的一口预探井。该井在钻井过程中,遇到许多困难,频繁发生钻具故障,平均机械钻速很低,例如 1 025. 61~1 106. 53 m 井段钻速仅为 0. 63 m/h,并在钻至井深 1 083. 34 m 时出现跳钻现象,最终导致钻具断裂。该井段钻具组合为:φ444. 5 mmXHP2C 钻头×0. 4 m+730×730×0. 6 m+φ228. 6 mm 减震器×5. 8 m+φ228. 6 mm 钻铤×17. 83 m+731×731×0. 3 m+φ444. 5 mm 稳定器×2. 2 m+φ228. 6 mm 钻铤×18. 8 m+731×630×0. 4 m+φ203. 2 mm 钻铤×89. 6 m+631×410×0. 4 m+φ177. 8 mm 钻铤×17. 4 m+φ127. 0 mm 钻杆。

减震器质量  $m_2=500$  kg,弹簧刚度  $K_2=5\ 000$

kN/m。

钻井参数:钻压 60~80 kN,转速 80 r/min。钻井液密度为 1. 13 kg/L。

按照上述分析过程,分析问题原因,并提出相应的解决方案。

### 5.1 共振分析

轴向振动固有频率见表 1。

表 1 轴向振动固有频率		
Table 1 Natural frequency of axial vibration		
阶数	固有频率/rad · s <sup>-1</sup>	共振转速/r · min <sup>-1</sup>
一阶	10. 56	33. 63
二阶	17. 43	55. 47
三阶	25. 70	81. 81
四阶	30. 46	96. 95
五阶	41. 15	130. 99
六阶	42. 83	136. 35

计算得到的固有频率是圆频率,频率需转化为转速才能使用。由于使用的是三牙轮钻头,钻柱轴向振动的共振频率是固有频率的 1/3,固有频率与

共振转速之间的转换公式为:共振转速=10×固有频率/π。由表 1 可知:当钻柱转速为 80 r/min 时,非常接近轴向第三阶共振转速 81.81 r/min,有可能诱发轴向共振,造成钻柱破坏。

扭转振动固有频率见表 2。

表 2 扭转振动固有频率		
Table 2 Natural frequency of torsional vibration		
阶数	固有频率/rad·s <sup>-1</sup>	共振转速/r·min <sup>-1</sup>
一阶	1.57	15.02
二阶	9.96	95.12
三阶	19.52	186.38
四阶	29.16	278.47

对于扭转振动,固有频率与共振转速之间的转换公式为:共振转速=30×固有频率/π。由表 1 可知:当钻柱转速为 80 r/min 时,与所有扭转共振频率相差较大,不会发生扭转共振。

横向振动分析认为:第 1 稳定器不会与上井壁碰撞;第 1 稳定器产生的激振频率为 0.11 次/s;第二跨中点与下井壁发生碰撞,碰撞速度为 0.002 m/s。

5.2 分析结论

综上所述,发生钻具损害事故来源于转速选择不合适,80 r/min 的转速接近钻柱第三阶轴向共振转速,会导致轴向共振,因而发生跳钻现象,致使钻具破坏。而扭转振动以及横向振动导致的与井壁的碰撞危害不大。需要注意的是:在转速 80~100 r/min 区间有三个可能导致轴向或扭转共振的点,分别为 81.81、95.12 和 96.95 r/min,因此应避免在该区间选择转速。

窿 9 井由于在钻井过程中并没有考虑进行振动控制及共振振动分析,发生了钻具断裂事故,出现了钻速低等问题,因此,应该重视钻井工程设计及实践中的振动控制,避免危险共振的发生,合理增加钻压,提高钻速,以达到安全快速钻井的目的。

6 结论与建议

1) 系统分析了钻头、钻柱系统结构、钻井参数、已钻井眼几何参数和地层性质对井下振动的影响,阐明了井下振动的发生、发展特征,提出根据可能发生的跳钻、横向冲击和粘滑三种异常振动模式建立相对适用的模型进行井下振动控制的

技术思路。

2) 制定了井下振动控制程序,为安全、快速钻井提供了有力的技术支持,这一方面体现在优化钻具组合,帮助获得优化的增斜、降斜或者稳斜钻具组合;另一方面是优化钻井参数,避免共振,减少钻头、钻柱系统振动引起的钻具损害,最大限度地增大钻压、转速,以提高钻井速度。

3) 应进一步开发实用的井下振动分析处理软件指导现场钻井施工,不断提高井下振动的控制水平。

参 考 文 献

[1] Dareing D W. Drill collar length is a major factor in vibration control[J]. JPT,1984,36(4):637-644.

[2] Sotomayor, Gabriel P G, Placido, et al. Drill string vibration: how to identify and suppress[R]. SPE 39002,1997.

[3] 刘伟. 钻头、钻柱系统振动研究及应用[D]. 北京:中国石油勘探开发研究院,2008.  
Liu Wei. Vibration research and application on drill bit and drill string system[D]. Beijing:Research Institute of China Petroleum Exploration and Development,2008.

[4] Jardine S, Malone D, Sheppard M. Putting a damper on drilling's bad vibrations[J]. Oilfield Review,1994,6(1):15-20.

[5] Niznik M R, Carson A D, Wise K J, et al. A new approach to stick-slip management integrating bit design and rotary-steerable-system characteristics[R]. IADC/SPE 98962,2006.

[6] 闫铁,韩春杰,毕雪亮. 斜井眼内钻柱轴向振动的有限元分析[J]. 石油钻探技术,2006,34(4):5-8.  
Yan Tie, Han Chunjie, Bi Xueliang. The finite element analysis on axial vibration of drill string in deviated wells[J]. Petroleum Drilling Techniques,2006,34(4):5-8.

[7] Heisig G, Neubert M. Lateral drillstring vibrations in extended-reach wells[R]. SPE 59235,2000.

[8] 屈展. 钻柱在内外钻井液流共同作用下的横向振动[J]. 石油机械,1995,23(4):40-43.  
Qu Zhan. Lateral vibration of drilling string caused by drilling fluid in the inner and outer drill pipe[J]. China Petroleum Machinery,1995,23(4):40-43.

[9] Brett J F. The genesis of torsional drillstring vibrations[R]. SPE 21943,1992.

[10] 郑新权. 窿 9 井:中国石油一口高难井[M]. 北京:石油工业出版社,2005:36-72,121.  
Zheng Xinquan. Well Long 9: a high difficult well of China Petroleum[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2005:36-72,121.