

# 钻柱动力学研究进展及发展趋势

狄勤丰, 杨赫源, 王文昌\*, 骆大坤, 张鹤, 陈锋

上海大学力学与工程科学学院, 上海 200072

\* 通信作者, wangwenchang1982@163.com

收稿日期: 2024-02-20

国家自然科学基金面上项目“考虑隔水管耦合作用的超深水超深曲井钻柱动力学研究”(编号: 52174003)和国家自然科学基金石油化工联合基金重点项目“超深井钻柱非线性动力学及动态安全性基础理论研究”(编号: U1663205)联合资助

**摘要** 钻柱动力学是安全、高效钻井的基础, 许多研究人员对此进行了深入研究, 成果累累。然而, 钻柱具有超大长细比, 工作环境恶劣, 非线性特征显著, 使得钻柱的安全性面临严峻挑战, 这在超万米特深井中尤为突出。因此, 把握钻柱动力学研究历程, 提炼钻柱动力学核心关键问题十分必要。本文在简要回顾3种基本钻柱振动形式的研究进展基础上, 重点阐述了这3种基本振动的耦合振动的研究进展, 详细讨论了粘滑和涡动这2种复杂振动的危害、形成机制、研究方法、测量技术和控制方法, 并对近十年来备受关注的高频扭转振动(HFTO)的研究进展进行了归纳。

现有研究成果表明, 涡动是井下钻柱最易出现的一种复杂振动形式, 包括向前、向后规则涡动和不规则涡动形式, 且大都体现为不规则涡动。其中, 反向涡动对钻柱的危害很大, 不但会加剧钻具的疲劳破坏, 而且会降低钻头的机械钻速。粘滑振动是另一种危害极大的复杂振动形式, 其形成机制在于钻头与岩石之间的相互作用, 并可用速度弱化效应进行很好描述; 粘滑振动与涡动密切相关, 粘滑振动中的滑脱阶段的最大转速可能达到地面转速的3倍以上, 并伴随着剧烈的涡动。而振动频率远高于涡动和粘滑振动的高频扭转振动的危害不容忽视, 但相关机理远未探明, 迫切需要攻关研究。

**关键词** 钻柱动力学; 复杂振动; 测量技术; 实验方法; 仿真技术

**中图分类号**: TE21; O341

## Research advances and development trend of drill string dynamics

DI Qinfeng, YANG Heyuan, WANG Wenchang, LUO Dakun, ZHANG He, CHEN Feng

School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** Drillstring dynamics is the basis of safe and efficient drilling, and many researchers have made in-depth research on it with fruitful results. However, the safety of drill string is faced with severe challenges due to its extremely large slenderness ratio, harsh working environment and significant nonlinear characteristics, especially in extra-deep wells exceeding 10,000 meters. Therefore, it is essential to grasp the research process of drill string dynamics and extract the core key issues. Based on a brief review of the research progress of the three basic drill string vibration forms, this paper focused on the research progress of the coupled vibration of these three basic vibration forms, and discussed in detail the harm, formation mechanism, research methods, measurement techniques and control methods of two complex vibrations: stick-slip and whirl. In particular, the research

引用格式: 狄勤丰, 杨赫源, 王文昌, 骆大坤, 张鹤, 陈锋. 钻柱动力学研究进展及发展趋势. 石油科学通报, 2024, 02: 224-239

DI Qinfeng, YANG Heyuan, WANG Wenchang, LUO Dakun, ZHANG He, CHEN Feng. Research advances and development trend of drill string dynamics. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 224-239. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.017

of high frequency torsional oscillation (HFTO), which has attracted much attention in recent ten years, was summarized. Finally, preliminary conclusions and prospects were provided, aiming to offer useful references for the innovative development of drill string dynamics mechanisms and control methods. The existing research results showed that the whirl is the most complex vibration form of downhole drill string, including forward and backward regular whirl and irregular whirl motion, and most of them are irregular whirl motion. Among all the whirl modes, backward regular whirl is more harmful to the drill string, which will not only increase the fatigue damage of the drill tool, but also reduce the mechanical penetration rate of the bit. Stick-slip vibration is another highly harmful and complex form of vibration, which is induced by the interaction between the drill bit and the rock and can be well described by the velocity weakening effect. Stick-slip vibration is closely related to whirl motion. The maximum rotational speed in the slip stage of stick-slip vibration may reach 6-8 times of the ground rotational speed, accompanied with violent whirl motion. The high frequency torsional oscillation, whose vibration frequency is much higher than that of eddy and stick-slip vibration, is even more harmful, and the related mechanism is far from clear and is urgent to explore.

**Keywords** drillstring dynamics; complex vibrations; measurement techniques; experimental methods; simulation techniques

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.017

石油、天然气、地热资源的勘探开发离不开钻井工程。据统计,用于钻井工程的费用占石油、天然气勘探开发的50%以上。而在钻井工程中,钻柱的安全性十分关键,是确保钻井工程顺利进行的基础。因此作为石油钻井工程的理论基础之一,钻柱力学一直倍受人们的重视。经过深入的研究和争论<sup>[1-3]</sup>,钻柱静力学的研究已趋成熟,并为钻井工程设计、分析提供了重要的依据。但是,由于钻柱处于狭长的井筒中做复杂的旋转和向下运动,受力和运动情况十分复杂,而钻头与岩石间的相互作用、钻柱与井壁间的碰摩接触、井下提速工具的特定运动等,使得钻柱发生剧烈的振动,直接影响钻具的安全和钻井效益。因此,钻柱动力学的研究十分重要。

钻柱动力学的核心是振动及其控制。钻柱的基础振动形式包括轴向振动、扭转振动和横向振动。这3种振动会单独存在也会相互耦合从而形成更复杂的振动。长期以来,人们一直认为最严重的振动形式分别为轴向的跳钻、周向的粘滑和横向的涡动,但随着测量水平的提高,人们注意并认识到另一种更具破坏性的振动形式—高频扭转振动(HFTO—High-Frequency Torsional Oscillation)。钻柱振动会损坏井下工具、降低钻井效率、增加非生产时间,甚至造成巨额经济损失和资源浪费。

深入了解钻柱的动力学行为,明确钻柱振动的发生机理,可以针对性地采取措施有效缓解钻柱振动,这对于当前超深井、特深井,尤其是超万米特深井的安全、高效钻井作业具有十分重要的意义。对于常规的轴向、扭转和横向振动形式,已有较全面的综述与归类,本文只做简单描述。本文只对钻柱复杂振动的理论研究、实验方法、测量技术等进行较详细的综述,探讨钻柱动力学研究最新进展,并展望发展趋势,旨

在为技术人员提供参考。

## 1 钻柱振动特征研究进展

钻柱动力学的研究内容很广,但其核心研究对象为钻柱的振动。钻柱振动的研究经历了一个由简入繁的过程,也即从钻柱单向(单一)振动、双向耦合振动到复杂振动的研究过程。

### 1.1 钻柱单向振动研究进展

关于钻柱动力学的研究最早出现在20世纪60年代,Finnie等人<sup>[4]</sup>率先用实验和试错法近似求解了不考虑阻尼情况下钻柱的固有频率。随后,钻柱动力学研究逐步得到重视,但限于早期建模与计算能力不足等原因,在分析钻柱振动时,只能对钻柱的轴向振动、扭转振动和横向振动分别进行研究。

#### 1.1.1 钻柱轴向振动

钻柱的轴向振动也被称为“纵向振动”。在早期钻井实践中,轴向振动由于会引起方钻杆和绞车绳上下晃动,因此被最早观察到。Finnie和Bailey<sup>[4-5]</sup>最早对垂直井眼中钻柱的轴向振动进行了初步研究,用实验和分析的方法近似计算了在不考虑阻尼情况下钻柱轴向振动的固有频率。随后,在长达60年的时间内,一批学者从轴向振动起因(Paslay和Bogy<sup>[6]</sup>)、轴向振动模型建立与求解(Skaugen<sup>[7]</sup>、王珍应<sup>[8]</sup>、Naganawa<sup>[9]</sup>、刘清友<sup>[10]</sup>)、激励模型(李子丰<sup>[11]</sup>)、关键参数对轴向振动的影响等方面进行了深入研究。Paslay和Bogy<sup>[6]</sup>指出引起钻柱轴向振动的主要原因是牙轮钻头与地层之间的周期性接触。李子丰<sup>[11]</sup>采用力激励法和位移激励法研究了钻柱的轴向振动,指出常规力边界条件模型得到的计算结果存在不足,提出应以钻头位移作为钻

柱轴向振动的边界条件。

### 1.1.2 钻柱扭转振动

旋转钻柱在狭长井筒内会发生扭转振动,从而使井下转速与地面转速不一样,并造成钻柱发生疲劳破坏,加剧钻头磨损。扭转振动产生的根本原因在于钻头与地层的相互作用,最剧烈的表现形式是扭转粘滑和低频扭转振动,一些提速工具因为会在钻柱上产生很大横向侧向力而诱导和加剧扭转振动<sup>[12]</sup>。Dareing等<sup>[13]</sup>率先建立了钻柱扭转振动的预测方法,预测结果与测量结果比较吻合,验证了理论的准确性。随后,一些学者围绕钻柱扭转振动固有频率(Dareing<sup>[14]</sup>、Khan<sup>[15]</sup>、王珍应<sup>[16]</sup>)、计算模型和求解方法(传递矩阵法—王珍应<sup>[16]</sup>、差分法—刘清友<sup>[17]</sup>)等对扭转振动进行了研究。Dareing等<sup>[14]</sup>认为通过调整BHA(Bottom Hole Assembly)的结构可以有效改变钻柱的扭转振动频率,进而消除或减轻扭转振动。

### 1.1.3 钻柱横向振动

与轴向振动和扭转振动相比,横向振动被发现的时间最晚。钻柱的横向振动主要发生于钻柱的BHA段,造成BHA疲劳破坏,及对井壁的碰撞,甚至破坏井筒。一些学者建立了钻柱或BHA的横向振动模型,计算了钻柱或BHA的横向振动频率(Huang<sup>[18]</sup>),研究了横向振动的起因及激励特征(高宝奎<sup>[19]</sup>),分析了温度(屈展<sup>[20]</sup>)、内外钻井液(Heisig<sup>[21]</sup>、李茂生<sup>[22]</sup>)、轴向载荷(韩春杰<sup>[23]</sup>)等对钻柱横向振动固有频率或振动特征的影响。结果表明,横向振动发生的主要原因是钻柱的屈曲和钻头与岩石间的相互作用,而温度的升高会降低钻柱的固有频率,提高转速或增大摩擦系数会使钻柱发生蛇形运动甚至是涡动,环空钻井液比钻柱内钻井液对钻柱的横向振动影响更大。特别是钻柱轴向荷载作用对钻柱横向振动的影响显著,拉力会增大钻柱的横向振动固有频率,而压力会使钻柱的横向固有频率减小。

## 1.2 钻柱耦合振动研究进展

随着研究的深入,人们逐渐认识到只考虑单一振动形式已无法揭示复杂工况条件下井下钻柱的动力学特征,因而开始分析各类振动之间的耦合效应对钻柱振动的影响。而计算机技术的快速发展,极大地推动了有限元法的应用,这为研究井下钻柱复杂振动创造了重要条件,有力促进了钻柱复杂振动的研究。

### 1.2.1 轴向—扭转耦合振动

鉴于对钻柱轴向和扭转运动的直观认识,人们很早就观察到了轴向—扭转振动之间的耦合,众多研究

人员建立了钻柱轴向—扭转耦合振动模型,对钻柱的轴向和扭转耦合振动进行了深入研究,典型的工作包括Elaysed和Raymond<sup>[24]</sup>、Sampaio<sup>[25]</sup>、Chi<sup>[26]</sup>、Voronov<sup>[27]</sup>、孟庆华<sup>[28]</sup>等人的工作。Elaysed和Raymond的实验研究结果表明,在低钻压情况下,扭转振动对轴向振动具有显著影响,而较大的钻压会使钻头无法自由移动,扭转振动对轴向振动的影响逐渐减弱。Sampaio比较了轴向—扭转耦合振动的线性和非线性模型,认为非线性模型更能反映井下钻柱的真实振动情况。Chi分析了轴向—扭转耦合振动对钻柱损伤的影响,认为这种耦合会显著缩短钻柱的寿命。Voronov研究了轴向—扭转耦合振动对钻头切削作用的影响,明确了钻头稳定切削的作业参数范围。孟庆华研究了气体钻井钻柱的轴向—扭转耦合振动,发现在气体钻井时钻柱中存在轴向—扭转耦合作用区、轴向单独作用区和未扰动区3个区域。

### 1.2.2 横向—扭转耦合振动

钻柱横向—扭转耦合振动是钻井过程中无法避免的一种振动形态,会造成钻杆断裂、刺漏等井下故障,对钻柱横扭耦合振动的分析有利于加深对钻进过程的理解(王鸿雁<sup>[29]</sup>)。典型的工作包括Christoforou和Yigit<sup>[30]</sup>、Leine<sup>[31]</sup>、张小柯和狄勤丰<sup>[32]</sup>、付雷<sup>[33]</sup>等人的研究。Christoforou和Yigit建立了钻柱横向—扭转耦合动力学模型,通过钻头转速将横扭振动耦合起来。仿真结果显示扭转振动对横向—扭转具有很强的影响,可通过缓解扭转振动消除包含横向振动在内的不稳定现象。Leine建立了由涡动子模型和粘滑子模型组成的涡动—粘滑模型,对钻柱动力学中扭转粘滑和横向涡动相互作用进行了分析,基于分岔理论解释了涡动产生时粘滑振动消失的原因。张小柯和狄勤丰基于复合交变强度理论,考虑钻柱涡动和轴向荷载的影响,建立了横向—扭转交变应力耦合模型,研究了钻柱在动态条件下的疲劳失效风险。付雷基于混沌理论,分析了钻井液作用、钻柱自重、钻压和钻柱长度等对横向—扭转耦合振动的影响。王鸿雁基于有限元和间隙元方法,对深水钻井钻柱横向—扭转耦合振动进行了分析,得出了钻柱横向—扭转耦合振动规律。

### 1.2.3 轴向—横向耦合振动

在钻井施工过程中,钻柱的轴向和横向耦合振动贯穿于钻进的整个过程。如轴向—横向耦合振动会导致钻柱发生参数共振,也即轴向振动引起钻压波动,与横向振动耦合会导致钻柱产生类似“蛇形运动”的运动(Dunayevsky<sup>[34]</sup>)。典型工作包括Christoforou<sup>[35]</sup>、Trindade<sup>[36]</sup>、Mahyari<sup>[37]</sup>、闫铁<sup>[38]</sup>的研究。Christo-

forou基于Lagrangian方法,考虑了陀螺效应、钻柱与井壁的接触、钻头与岩石相互作用引起的轴向激励、泥浆阻尼,建立了钻柱轴向—横向耦合振动模型并进行了求解,揭示参数共振与涡动会同时存在。Trindade考虑了非线性应变位移关系,建立了钻柱轴向—横向耦合振动有限元模型,使用Karhunen-Loeve分解方法将钻柱振动模型降阶求解。Mahyari基于连续梁理论,建立了钻柱的轴向—横向耦合振动模型,使用试错法研究了带1到3个稳定器的最佳位置。闫铁<sup>[38]</sup>以定向井为研究目标,建立了钻柱轴向—横向耦合振动有限元模型,发现钻柱轴向—横向耦合振动与钻柱的材料性能有关,因此可通过优选钻柱材料以缓解钻柱振动。

#### 1.2.4 轴向—扭转—横向耦合振动

由于钻柱与井壁的接触、钻头与岩石间的相互作用、钻柱偏心等原因,钻柱在钻井过程中时刻受到轴向振动、扭转振动和横向振动的影响,大部分情况下钻柱的振动是3种振动的耦合结果。对钻柱轴向—扭转—横向耦合振动的研究,对提升钻柱复杂工况的诊断、提升钻井性能、保障钻井安全具有重要作用(程载斌<sup>[39]</sup>)。

关于钻柱三维耦合振动的研究,主要包括3个方面:一是轴向—扭转—横向耦合振动模型建立,二是求解方法,三是应用。内容很多,将在后文复杂振动研究进展中详述。

## 2 复杂振动研究进展

由前面的分析可知,钻柱振动虽然基于3种基本的形式,但更多的是一种耦合形式的振动属于复杂振动范畴。除轴向跳钻外,粘滑振动和涡动是2种典型的复杂振动形式,对井下钻具安全和钻井效率影响极大。

### 2.1 粘滑振动研究进展

粘滑振动是扭转振动中危害较大的振动,主要表现为粘滞阶段与滑移阶段的周期性交替。在粘滞阶段,钻头或部分钻柱完全静止;滑移阶段,钻头或BHA的转速可达到地面转速的3倍以上。粘滑振动不仅会降低工具使用寿命,还会增加非生产时间,造成钻井费用的增加。因此,许多学者围绕粘滑开展了较深入的研究。关于粘滑振动的研究可以归纳为以下几个方面,即粘滑振动产生原因探索、粘滑振动模型建立、粘滑振动实验研究。祝效华等<sup>[40]</sup>对粘滑振动的研究进行了

较全面的综述,为技术人员提供了一个有用的参考资料。

关于粘滑振动产生的原因,大部分研究人员认为与速度弱化效应有关。速度弱化效应是指在恒定的钻压下,钻头扭矩随着转速增加而减小的现象。Belokobylskii<sup>[41]</sup>指出速度弱化效应中钻头扭矩与转速的关系是一个非线性关系,并用指数函数对其进行了表达。Brett<sup>[42]</sup>发现PDC钻头的速度弱化效应会导致钻柱产生扭转粘滑振动。随后,众多学者和研究人员使用不同的函数形式来表示速度弱化效应中钻头扭矩与转速之间的关系,其中包括指数函数(Avarro-López<sup>[43]</sup>)、反比例函数(Zhao<sup>[44]</sup>)、多项式函数(Ritto<sup>[45]</sup>)、双曲正切函数(Yigit<sup>[46]</sup>)和其他形式的函数(Jansen<sup>[47]</sup>)等等。但上述研究成果只考虑了钻头的扭转振动,而忽略了钻头轴向和扭转之间的耦合作用。Kovalyshe<sup>[48]</sup>指出,粘滑振动产生的原因不是速度弱化效应,而是钻头与岩石之间的相互作用。

粘滑振动的研究更多地采用仿真分析的方法。建模仿真具有测试时间短、成本低等优点,可考虑的因素更加全面,许多学者使用模型仿真研究钻柱的粘滑振动。

Richard等<sup>[49-50]</sup>通过钻头与岩石相互作用规律将轴向振动与扭转振动耦合,并考虑了钻头与岩石界面间的摩擦接触和切削过程,研究了带切削钻头钻柱的粘滑振动。结果表明,任何微小的扰动都可能使钻柱产生自激振动,并在一定条件下可发展为粘滑振动,认为速度弱化效应是系统的固有特性,不是基于钻头与岩石相互作用的速度规律。

随后,一些学者基于Richard模型,对粘滑振动进行了深入研究。Zamanian<sup>[51]</sup>对Richard模型进行了改进,研究了钻井液阻尼和主动阻尼系统对钻柱粘滑振动的影响,认为增大钻井液阻尼和选择合适的主动阻尼比可有效缓解粘滑振动。Germay<sup>[52]</sup>采用有限元方法研究了钻柱的粘滑振动,得到钻柱轴向和扭转的多阶振动模态,不仅观察到Richard离散模型的一些现象,如速度弱化效应,还观察到产生粘滑振动的频率大于钻柱的第一阶固有扭转频率。随后,Germay<sup>[53]</sup>指出耦合模型中轴向振动比扭转振动快,因此可将耦合模型进行解耦,推导了轴向振动模型的近似表达式,并得到速度弱化效应是轴向振动产生的重要结论。Nandakuma<sup>[54]</sup>指出Richard模型中忽略了轴向柔度和阻尼的影响,因此在任何转速和钻压下系统都是不稳定的,与实际情况不符。在考虑钻柱的轴向柔度和扭转阻尼的影响后,对轴向—扭转耦合系统进行了稳定性

分析,绘制了稳定性边界图,得出增大转速有利于提高系统稳定性的重要结论。

Kovalyshe<sup>[48]</sup>对轴向一扭转二维模型研究后认为,虽然轴向振动与扭转振动之间存在耦合关系,但两者的产生原因不同,轴向振动的产生是由于再生效应,而扭转振动的产生是因为钻头的切削作用和钻头磨损面与岩石之间的相互作用。随后通过实验进一步证明了这一观点,认为可通过改变轴向柔度对粘滑进行缓解。

韩春杰<sup>[55]</sup>、牟海维<sup>[56]</sup>、汤历平<sup>[57]</sup>、Sadeghi<sup>[58]</sup>等通过建立集中质量扭摆模型研究了影响粘滑振动的关键因素,认为随着地面转速的降低和钻柱长度的增加,粘滑振动频率降低,粘滑振动将更加剧烈,同时存在一个临界钻压,大于临界钻压极易发生粘滑振动,可通过调整钻压、转速等钻井参数消除粘滑振动。

## 2.2 钻柱涡动研究进展

当钻柱在绕自身轴线顺时针旋转的同时绕着井眼轴线转动的现象称为涡动,是钻柱剧烈横向振动的表现形式。当涡动方向为顺时针方向时称为正向涡动(或向前涡动),反之则称为反向涡动(向后涡动)。相对而言,反向涡动对钻柱的危害更大(Kapitaniak<sup>[59]</sup>),会加剧钻具的疲劳破坏(史玉才<sup>[60]</sup>)、降低钻头的机械钻速(Chen<sup>[61]</sup>)。

高德利<sup>[62]</sup>对涡动的产生、状态描述方法等进行了研究,认为钻柱在形成涡动时会消耗大量的能量,因此钻柱的涡动是一个相对稳定的状态。钻柱与井壁间的空隙对涡动形成的影响较大,空隙越大,形成无滑动涡动的可能性越大;空隙越小,越容易形成正向涡动。

同样数值模拟也是钻柱涡动特征的主要研究方法,一些学者在这一领域开展了深入研究,取得了很好的效果<sup>[21,63-65]</sup>。这些研究包括钻柱涡动的形成机制,初始构形、转速、摩擦系数、轴向力、不同钻井液介质等对钻柱涡动的影响。Heisig<sup>[21]</sup>的研究结果表明,存在临界转速,当转速超过它时,钻柱会发生“蛇形运动”——沿着井壁上下滑动,当转速远远大于临界转速时,钻柱就会发生涡动。随着转速和摩擦系数的增大,钻柱更容易发生涡动,且发生涡动后,再降低转速不会使涡动消失。Melakhessou<sup>[63]</sup>的研究表明初始构形对BHA的涡动轨迹影响很大,因而有必要合理设计BHA的初始构形。Vijayan<sup>[64]</sup>的研究则表明,轴向力是影响涡动的一个重要因素,减少轴向力可以减少钻柱反向

涡动的发生。王明杰<sup>[65]</sup>的研究表明气体钻井时钻柱的涡动更加剧烈,涡动速度是泥浆钻井涡动速度的2倍以上。

## 2.3 复杂振动实验研究进展

研究钻柱复杂振动的最直接方式是实验方法,许多学者都通过建立实验装置来研究钻柱的井下振动特征。一方面实验研究对于补充理论研究、减轻动态模型的复杂性至关重要,另一方面,实验结果还经常用来校正及确定钻柱动力学模型的相关参数。实验装置主要包括2类,一是基于相似准则的模拟装置,二是全尺寸钻井实验装置,前者主要用于机理研究,成本低,但实用性差;后者建造成本高,但可以进行全尺寸模拟实验,实用性好。由于钻柱动力学响应特性的复杂性以及实验参数的多样性,大部分钻柱动力学实验装置仅用于研究钻柱特定的振动特性。根据研究的钻柱振动特性,这些基于相似准则的模拟实验装置又可以分为两类,一类专用于研究钻柱粘滑振动,另一类用于研究钻柱横向振动及涡动特性。研究钻柱粘滑特性的实验装置大多用一根顶部由电机驱动的细长钢管表征钻柱,钻头和钻柱通常用圆柱体表示。钻头对岩石的切削作用通常通过振动器和制动器来模拟,钻头钻压和扭矩均通过这些振动器和制动器施加。研究钻柱横向振动的实验装置由表示钻柱的柔性钢管和一个表示井筒的刚性外壳组成,柔性钢管和刚性外壳的环空间隙中充满水或油以模拟钻井液对钻柱横向振动及涡动特性的影响。

根据Patil和Teodoriu<sup>[66]</sup>最近的综述,除了石油公司拥有的大型室内实验装置外,国内外学术机构也研发了一些研究钻柱动力学的实验装置。1970年,Fritz<sup>[67]</sup>通过室内实验研究,探讨了环空流体对转子动力学附加质量和阻尼的影响,为进一步研究钻柱动力学奠定了基础。Mihajlovic<sup>[68]</sup>通过建立数学模型及室内实验装置研究了摩擦诱导钻柱粘滑振动的产生及其对应极限环的性质。模拟结果与实验结果非常相似,证实了该模型在研究摩擦诱导钻柱极限环方面的可靠性。而且低速时的负阻尼特性和高速时的粘性摩擦之间的相互作用,决定了摩擦引起的粘滑振动(极限环)的发生及其性质,以及维持粘滑振动的参数范围。此外,不连续分岔在粘滑振动的产生和破坏中起着至关重要的作用。特别是,法向力对摩擦特性具有重要影响,摩擦接触中的法向力以一种相当复杂的方式影响摩擦力,并能产生较高的负阻尼水平(对于较高的法向力),这反过来又能在更大的参数范围内产生振幅更高的粘

滑振动。Khulief和Al-Sulaima<sup>[69]</sup>设计了专门的室内钻井试验台以研究钻柱的动力学特性。该试验台可模拟钻柱在各种激励机制下的振动响应,包括粘滑特征、钻柱—井壁接触和钻柱—钻井液相互作用。实验台由变速电机驱动,使用磁性张力制动器来模拟粘滑,使用振动器激发钻柱的轴向振动,以模拟钻压波动。实验测量结果用以确定和调整钻柱有限元模型参数。

国内章扬烈<sup>[70]</sup>、管志川<sup>[71]</sup>、史玉才<sup>[60]</sup>等建立与利用室内模拟实验装置进行钻柱涡动特征实验研究。章扬烈的实验结果表明,反向涡动会加速钻柱的疲劳破坏、加速接头和套管的磨损,而使用润滑钻井液是改善钻柱涡动的有效途径。管志川和史玉才的实验表明,在一定转速下底部钻柱会出现反向涡动状态,且转速越高,越容易形成涡动,而增加钻压,会抑制涡动的形成。随着转速的增大,BHA会从正向涡动状态转变为反向涡动状态。

还有一些学者利用全尺寸钻井实验装置进行了实验研究。Cooley<sup>[72]</sup>的模拟实验表明涡动会加速PDC钻头的磨损,通过钻头设计和调整钻井参数可抑制涡动,这一理念已应用于许多开发商生产的钻头中。Leine<sup>[31]</sup>的实验发现钻柱先发生粘滑运动后发生涡动,偏心率、陀螺效应等是钻柱从粘滑向涡动转变的关键因素。Kapitaniak<sup>[59]</sup>使用Aberdeen大学研制的多功能钻机进行了实验,观察到了周期涡动与混沌涡动共存、正向涡动和反向涡动共存的现象,而且随着钻柱转速和钻压的增大,这种涡动越来越具有周期性。而需要特别指出的是,Schlumberger公司建立的全尺寸模拟平台一方面用于检测下井测试工具中传感器的可靠性,另一方面为人们提供了典型的涡动实验视频,可以观察到随着转速的增加,正向涡动、反向涡动和混沌运动的存在和变换。

### 3 钻柱动力学模型及求解方法研究进展

由于钻柱动力学求解面临超长细比和双重非线性特征的考验,利用解析法求解井下钻柱的动力学特性几无可能,因此许多学者一直致力于数值模拟方法的探索。对钻柱动力学特性进行数值建模分析,目前主要有3种方法:集中质量法、有限元法及多体动力学方法。

#### 3.1 集中质量法

将钻柱集成为大型质量、刚度、阻尼矩阵进行计算,也就是人们常说的集中质量法。国内外许多

学者和研究人员使用集中质量法对钻柱动力学特性进行了分析。这些工作又可以分为2大类,一是自由度较少的情况,如Clayer<sup>[73]</sup>、Jansen<sup>[74]</sup>、Tucker<sup>[75]</sup>、Khulief<sup>[76]</sup>、Shor<sup>[77]</sup>、Moracs<sup>[78]</sup>等人的工作;另一类则是自由度较多的情况,如Ritto<sup>[45]</sup>、Chen J<sup>[79]</sup>、朱杰然<sup>[80]</sup>等人的工作,自由度可达几十个。

在这些研究中,Jansen<sup>[74]</sup>、Khulief<sup>[76]</sup>等人的工作较具代表性。Jansen的研究主要针对BHA,将2个稳定器之间的钻铤简化为集中质量,研究了BHA的涡动特征,所得结果相当经典,并已被多个学者的研究所用,如狄勤丰等<sup>[81]</sup>将其应用于预弯曲动力学防斜打快技术的机理研究,并据此分析钻压、转速及BHA结构参数对钻头动态侧向力的影响;Khulief的研究主要针对钻柱系统,综合考虑了陀螺效应、弯曲与扭转耦合、重力刚化效应、轴向—横向几何非线性、钻柱与井筒的非线性接触的影响,研究工作系统、全面。

集中质量模型的研究对一些重要现象的发现起到了很好的作用。Moracs<sup>[78]</sup>的研究发现,增加钻压和降低转速容易发生跳钻与粘滑的共存,增加转速可能导致跳钻与涡动共存现象的发生。Chen J<sup>[79]</sup>的研究则表明,增大钻压会加剧扭转振动,甚至出现粘滑现象;强扭转振动会增大轴向振动,而增大转速,不容易产生强烈的扭转振动。朱杰然<sup>[80]</sup>认为钻柱与井壁之间的摩擦会导致钻柱发生粘滑振动,增大地面转速,能抑制粘滑振动。

集中质量法方法除了应用于钻柱动力学分析,也应用于海洋钻井平台中的隔水管柱振动的分析。Kavanagh<sup>[82]</sup>为研究涡激振动对隔水管柱动力学响应的影响,建立了隔水管涡激振动模型。王宴滨和高德利<sup>[83]</sup>基于多自由度集中质量法系统,建立了深水钻井隔水管力学模型,用子空间迭代法对系统进行了求解,认为随着作业水深和张紧器运动幅值的增加,隔水管底部组合与防喷器之间的碰撞加剧。

#### 3.2 有限元方法

对于复杂的井下振动情况,集中质量法由于模型简单、精度较低等原因,可能无法对复杂的井下钻柱动力学特性进行较准确分析。有限元法将钻柱划分为更多的单元,可更好地模拟钻柱井下状况,获得更精确的模拟结果。国内外许多研究人员利用有限元法进行钻柱动力学建模和求解。

较早的利用有限元方法进行钻柱动力学研究的工作出现在Millheim和Apostal<sup>[84]</sup>的文献中,他们基于D'Alembert原理,建立了三维有限元分析模型,首

次较为系统地对钻柱振动问题进行了研究。随后一系列研究工作相继出现,如Birades<sup>[85]</sup>、帅健<sup>[86]</sup>、Dykstra<sup>[87]</sup>、Ritto<sup>[88]</sup>、祝效华<sup>[89]</sup>、胡以宝<sup>[90]</sup>等的研究。刚开始,人们主要利用有限元方法来研究BHA的动力学特性,分析参数对井眼轨迹的影响。后来,Dykstra<sup>[87]</sup>基于Himilton原理,考虑钻柱的几何非线性和接触非线性,推导了钻柱动力学有限元模型,并针对当时计算机能力较弱的状况,用迭代法计算了钻柱的静态解,分别用模态法和Newmark法计算了钻柱动力学稳态解和瞬态解。后来,许多学者基于Dykstra有限元建模原理,进行了大量研究,取得了丰硕成果<sup>[89-95]</sup>。

祝效华<sup>[89]</sup>在Dykstra有限元模型基础上,建立了三维井眼全井钻柱动力学有限元模型,采用Wilson- $\theta$ 逐步积分法研究了具有不确定性和动态边界的大型非线性系统的求解方法。狄勤丰、王文昌、胡以宝等<sup>[90-94]</sup>在Dykstra有限元模型基础上,考虑了钻柱的初始曲率,结合Lagrange方程,以空间曲梁单元为基础建立了钻柱动力学有限元模型,开发了钻柱动力学仿真程序,实现了超7000 m钻柱的动力学特性分析,分析了全钢钻柱、带铝合金钻杆钻柱,以及带不同提速工具、减震器钻柱的动力学特性,形成了基于动态安全性的钻柱结构参数和钻井参数的优化方法。张会增<sup>[95]</sup>用广义Alpha法对钻柱动力学有限元模型进行求解,分析了PDC钻头与岩石之间的相互作用对钻柱振动的影响。目前,有限元方法仍是钻柱动力学特性分析的主流方法。

### 3.3 多体动力学方法

多体动力学方法能够对大型复杂系统的动力学特性进行快速准确分析和预测(戎保<sup>[96]</sup>),诸多学者使用多体动力学方法建立了钻柱动力学模型,取得了重要成果。

程载斌<sup>[97]</sup>最先尝试利用多体动力学方法研究钻井管柱动力特性,并与任革学等合作,基于绝对节点坐标法建立了全井钻柱系统多体动力学模型,采用向后差分隐式积分算法对模型进行求解,实现了钻柱粘滑、涡动、动态屈曲、跳钻等井下动力学特性,且在精度和计算速度上都具有明显优势,较好地发展了钻井管柱多体动力学与控制理论及其应用技术<sup>[98-100]</sup>。随后,杨蔡进<sup>[101]</sup>、王宁羽<sup>[102]</sup>、马彦会<sup>[103]</sup>、刘佳鹏<sup>[104]</sup>、陈楷东<sup>[105]</sup>、陈家琦<sup>[106]</sup>、杨程<sup>[107]</sup>等在这一领域开展了深入探讨,取得了很好的成果,研究工作涉及用于研究滑动导向钻井工具面动态控制技术的刚-柔耦合系统多体动力学模型<sup>[102]</sup>、钻井液流体运动对钻井管柱动力

学特性的影响<sup>[103]</sup>、ALE梁单元与几何精确梁单元结合计算<sup>[104]</sup>、井下钻具组合的导向能力预测<sup>[105]</sup>、深井钻柱系统动力学与控制一体化求解效率<sup>[106]</sup>、钻井平台一隔水管一水下井口耦合系统的多体动力学模型<sup>[107]</sup>等,极大地丰富了钻柱动力学研究体系。目前钻柱多体动力学研究成果已在中海油得到较好应用。

## 4 钻柱振动测试技术研究进展

虽然钻柱动力学模拟方法有利于对井下振动进行分析,但判断井下振动情况的最直接和最有效手段是利用测量工具进行实时测量。为此,许多公司或技术人员在这一领域开展了研究,取得了重要进展。井下振动测量工具主要是基于测量井下加速度研发的工具,不同的公司采用了不同的测量原理,对应的加速度传感器的安装方式也不一样。井下振动测量技术的另一个重要的方面是对测量数据的处理,包括傅里叶变换、小波理论等。分析测量数据,判断井下振动特征,可以为优化钻井参数或钻柱结构提供参数确定依据,从而减少钻柱振动,实现高效钻井作业。

### 4.1 国外钻柱振动测试技术研究进展

国外多个油田技术服务公司都推出了井下振动测量工具,如Schlumberger公司的多轴振动测量系统、Baker Hughes的地面测量系统和近钻头测量系统、Halliburton公司的钻柱动态传感器系统、APS公司的钻柱动态监控系统、NOV公司的BlackBox记忆测井系统等。

Schlumberger是全球最大的油服公司,开发出多款井下振动测量工具<sup>[108-110]</sup>。最早的实时测量短节,主要测量三轴加速度、钻压、弯矩和扭矩等参数(Cook<sup>[108]</sup>)。后来开发的多轴振动测量系统(Ashley<sup>[109]</sup>),由3个正交安装的加速度计和1个应变计组成,居中安装于钻柱轴心位置。横截面上两正交安装的加速度计测量钻柱的横向振动,轴向加速度计测量钻柱的轴向振动,扭转振动由应变计测量。近年来,为了获得高频振动数据,又开发出一款新型井下新型测量短节(Boeler<sup>[110]</sup>),其由19个传感器组成,采样频率达1000 Hz,能够记录长时间的高频数据,这可为确定BHA主要振动类型的变化和引起振动类型变化的原因提供重要数据。

Baker Hughes公司是全球油田服务行业的另一个领先者,所开发的地面和井下振动测量工具得到了广泛的应用<sup>[111-113]</sup>。地面测量系统安装于钻杆上方,可测

量轴向力、三轴加速度和转速等参数,可准确判断钻柱的轴向振动和扭转振动,但无法对井下横向振动进行准确判断<sup>[111]</sup>。近钻头测量系统由轴向加速度计、两个正交弯曲应变仪、两个正交磁力计、钻压应变计和扭矩应变计组成,分别测量轴向加速度、横向弯矩、转速、钻压和扭矩<sup>[112]</sup>。为了准确测量钻头的粘滑振动,Ledgerwood<sup>[113]</sup>使用由一组特殊加速度计组成的近钻头振动传感器系统测量近钻头处的三轴振动和钻头转速,并通过钻头转速随时间的变化判断是否发生粘滑振动。实测结果表明,粘滑是钻头处最主要的振动形式,粘滑过程中高转速下的横向振动会导致钻头损坏,是PDC钻头损坏的常见原因。

Holliburton公司研发了一套钻柱动态传感器系统<sup>[114]</sup>,利用偏心安装于测量短节中的三轴加速度计测量钻柱的轴向、切向和径向加速度。测量原理为:轴向振动由轴向加速度计测量;当切向加速度和径向加速度相差较小时发生横向振动,当三轴加速度值产生周期性波动时发生粘滑振动,当同时出现显著横向振动和扭转振动时即为涡动。鉴于地面和常规测量短节无法直接测量发生在钻头处的振动,Rebrikov等人<sup>[115]</sup>研发了直接安装在钻头上的由13个传感器组成的存储式传感器系统,采样频率达1000 Hz,可连续记录150 h。

APS公司研发出了由监测系统和振动控制系统两部分组成的钻柱振动监控系统<sup>[116]</sup>。监测系统由4个加速度计和1个磁力计组成,其中3个加速度计以120°辐射式偏心安装于测量短节径向方位,测量钻柱的横向振动;另一加速度计独立安装于轴向,测量钻柱的轴向振动;磁力计测量钻柱的转速。使用该监测系统可实时监测钻柱振动,并根据实际情况调整振动控制系统的结构阻尼,从而保持稳定的钻压,减少钻柱振动,提高工作效率。

NOV公司于2016年推出了BlackBox Eclipse井下记忆模式测量工具<sup>[117]</sup>,能够精确测量并记录井下转速、三轴振动和温度,采样频率为800 Hz。通过测量数据,可帮助技术人员了解井下多个位置的横向振动、粘滑振动等信息,识别造成钻井效率低下的原因。随后,该公司于2020年推出具有更高的精度和采样频率的BlackBox Eclipse第二代井下测量工具。

#### 4.2 国内钻柱振动测试技术研究进展

与国外相比,国内在这一领域的研究起步较晚,振动测量技术落后于国外。早期的振动测量技术以地面测量为主,如高岩等<sup>[118]</sup>设计出的钻柱振动信号地面

测量系统可以测量钻柱的轴向加速度,并利用小波分析和谱分析来判断三牙轮钻头的粘滑振动。

随着井下振动的复杂性提高,为弥补地面测量技术对井下振动参数的诊断准确性不足的缺陷,井下振动测量工具得到了发展。早期限于实时传输技术的限制,主要使用的是存储式井下振动测量工具。管志川<sup>[119]</sup>于2002年设计出了存储式井下测量接头,可同时测量弯矩、扭矩、三轴加速度、轴向力、内外压力和井下温度共9项参数。赖欣<sup>[120]</sup>设计出了可适应125℃井下温度、60 MPa井下压力环境下的随钻测量系统。翟小强<sup>[121]</sup>设计的存储式井下振动测量工具由电子测量系统和机械系统两部分组成,三轴加速度传感器测量的范围达-200~200 g、分辨率为0.1 g,可满足绝大多数钻井作业中振动测量的要求。腾学清等<sup>[122]</sup>使用ESM(Environmental Severity Measurement)测量工具测量了塔里木油田克深区块超深井的井下钻柱振动特征,ESM被偏心安装于测量短节中,其偏心距为4.7 cm,采样频率为120 Hz。薛启龙<sup>[123-124]</sup>研发了井下高频测量短节,其内部环形对称安装了由三轴加速度计及单轴陀螺仪集成的传感器,具有采集频率范围大(0.2~5 kHz)、振动测量量程大( $\pm 100$  g)、耐高温(0~125℃)、续航长(100 h)等优点。该测量短节可高频采集井下钻具动力学数据,获取钻进过程中近钻头处的三轴加速度和转速。

随着井下振动复杂度提升,仅使用存储式测量工具无法满足对井下实时数据的需求,国内研究人员也开发出将测量数据传输至地面的实时振动测量技术。贾衡天<sup>[125]</sup>设计了随钻井下动态参数测量系统,能够测量井下钻压、扭矩、转速和温度等重要参数,并直接与MWD工具对接,通过MWD工具将井下实际作业参数传输至地面。吉玲等人<sup>[126]</sup>开发出配合旋转导向工具的井下振动测量模块,内含高性能角速率陀螺仪和压电式三轴加速度计。实时钻进过程中,井下振动测量模块可将详细数据实时记录并存储,同时将井下振动量级和粘滑系数等信息通过泥浆脉冲遥传技术传输至地面,供钻井工程师实时判断井下工况。

## 5 高频扭转振动(HFTO)研究进展

二十年来,井下测量技术的发展使得人们可以用超过1000 Hz的采样频率测量井下钻柱的振动数据。不断提高的采样频率和数据质量使研究者能更好地认识和理解井下的钻柱动力学特性。通过对高频井下测量数据的分析,人们发现了HFTO现象。HFTO发生



时, 钻柱的不同位置会产生高频扭转载荷, 其大小程度取决于BHA的设计、共振振型、钻头类型、钻井液参数、岩石硬度以及钻井参数等。钻井实践表明, HFTO是造成井下工具发生故障的重要原因, 如电子元件故障、BHA中钻铤上与轴向成 $45^\circ$ 的裂纹、钻头牙齿损坏以及螺纹连接松动等。

一般认为, HFTO发生的根本原因是钻头与岩石的相互作用激发了BHA的扭转共振<sup>[127-128]</sup>。在硬质岩层中, 钻头与岩石相互作用产生的激励包含较高的能量且分布在很宽的频谱上, 增加了钻柱产生高频不稳定性的可能性。Pastusek<sup>[129]</sup>提出, 在一定情况下, 钻头与岩石的相互作用会形成有规律的井底岩石剖面, 从而使BHA发生自激的扭转振动, 当振动频率接近BHA扭转固有频率时, 会导致HFTO的发生。Oueslati<sup>[130]</sup>计算了钻井过程中所用BHA的扭转固有频率并与井下测量加速度的主频对比, 证明了HFTO是钻头/岩层相互作用引起BHA扭转共振的结果。为了验证钻头切削岩石作用是HFTO的激励源, Jain<sup>[127]</sup>进行了单钻齿切削岩石试验, 观察到切削硬质岩层时的切削载荷的主频约为500 Hz。

由于HFTO传播沿钻柱快速衰减, 且仅在BHA或下部钻柱的局部出现, 因此很难通过地面测量数据诊断其是否发生。Oueslati<sup>[130]</sup>和Jain<sup>[127]</sup>均比较了在螺杆钻具下方和上方收集到的切向加速度信号, 结果表明在泥浆马达下方测量到的切向加速度主频为245 Hz, 振幅为25 g, 而这一主频消失在泥浆马达上方测量的切向加速度中。这一研究清楚地表明HFTO局限在BHA下部, 螺杆钻具转子和定子之间在扭转方向解耦, 从而阻止了HFTO的传播。Shen<sup>[131]</sup>和Zhang<sup>[132]</sup>注意到, 即使在没有泥浆马达的情况下, HFTO也不能传播到地面。在这种情况下, 作者认为钻柱起到了滤波器的作用, 为扭振提供了通带和止带: 如果HFTO频率落入频率止带, 那么HFTO将沿钻杆大幅衰减, 从而将扭转能量截留在BHA中。

与粘滑现象相比, HFTO发生在更高的频率范围内, 其主频率通常大于20 Hz, 有时甚至高达700 Hz<sup>[133]</sup>。尽管高频扭转振动一词最早由Pastusek<sup>[129]</sup>提出, 但在这之前已经观察到了高频扭转振动现象。如在1986年Halsey<sup>[134]</sup>测量了高达40 Hz且包含多种模态的扭转振动现象。后来许多专家采用不同方法, 测得了HFTO。Chen<sup>[135]</sup>于2006年记录到了高达195 Hz的扭转振动频率, 并认为高频扭转振动是导致旋转导向工具部件失效的主要原因。2019年, Sigiura和Jones<sup>[133]</sup>使用采样频率高达1600 Hz的嵌入式传感

器对北美陆地钻井HFTO现象进行了监测, 观察到了HFTO主频率转移、微粘和微滑现象。

井下切向加速度及其频谱以及钻头转速及其频谱通常用于诊断HFTO是否发生。由于三轴加速度计偏心安装在钻铤或钻头上, 其测量结果受钻铤/钻头涡动的显著影响。当钻柱未发生涡动时, 三轴加速计的轨迹为圆周运动, 因此切向加速度可以等效为钻头角加速度, 然而当钻柱发生涡动时, 三轴加速计的运动轨迹为极不规则的曲线, 切向加速度不仅包含了角加速度而且包含了钻柱涡动导致的线加速度。因此, 高频的涡动引起的切向加速度与HFTO引起的切向加速度时程曲线和频谱特征十分相似<sup>[136]</sup>。相比而言, 井下陀螺仪是测量HFTO的理想工具, 因为它对BHA的横向和轴向运动不敏感, 仅反映井下扭转振荡。井下测量数据还表明, HFTO一般与粘滑振动、涡动以及高频轴向振动耦合发生。

利用数学模型模拟HFTO可以系统地研究HFTO的机理及影响因素。然而, 由于HFTO普遍发生在用带螺杆钻具BHA钻进硬质地层过程中, 因此HFTO的模拟不仅需要考虑螺杆钻具复杂的几何结构和工作原理, 而且需要考虑钻头与岩石的相互作用, 极大地增加了建模难度。Tikhonov和Bukashkina<sup>[137]</sup>考虑了以上各个因素开发了三维钻柱动力学模型模拟HFTO, 获得的HFTO的峰值频率与现场测量HFTO的主频一致。作者认为, 由于螺杆钻具的存在, 与钻头连接的螺杆钻具主轴与BHA其他部分之间缺乏刚性耦合, 使得钻头能够自激产生相当大振幅的HFTO。此外, HFTO的频率在很大程度上取决于螺杆钻具的动力学特性。Chen<sup>[138]</sup>及Abedrabbo<sup>[139]</sup>分别利用有限元方法模拟了HFTO, 其模拟结果均与井下测量结果的主频相接近, 证明了其模型的有效性。

随着对HFTO产生机理认识的不断深入, 人们利用不同的方法和工具以消除HFTO的发生或抑制HFTO的振幅。考虑到钻头与岩石的相互作用是诱发HFTO的主要原因, Chen<sup>[140]</sup>通过分析钻头结构与井下测量数据后发现, 可以通过改进钻头设计来抑制包括HFTO在内的钻柱耦合振动的发生。Tipples<sup>[141]</sup>通过室内实验的方法研究了钻头结构与HFTO之间的关系, 结果表明采用浸渍金刚石钻齿和改进钻齿倾角可以减弱HFTO的振幅。此外, Hohl<sup>[142]</sup>发现钻头和螺杆钻具之间的钻铤略有变化(外径变化在-5%到20%之间), 与HFTO相关的钻进稳定性就会显著提高, 最高可达370%, 因此提出可以通过优化BHA的结构以减少HFTO的发生。Heinisch<sup>[143-144]</sup>根据机械低通滤波器

的概念开发了一种 HFTO 隔离工具。该工具的扭转刚度低于 BHA 的其他部分。全尺寸实验室测试表明,该工具能够将 HFTO 强度降低 5 倍,而在恶劣环境(已知会激发 HFTO)中的测试证实了该工具在隔离 HFTO 和提高 BHA 可靠性方面的有效性。关于 HFTO 更详细的研究工作,Zhang 等<sup>[145]</sup>给出了一个较详细的综述。

## 6 钻柱动力学研究展望

随着超深井、特深井,尤其是超万米特深井的不断增多,在一般深井中并不突出的钻柱动力学问题逐渐显得更加突出,原因在于钻柱所受载荷不断逼近强度极限,钻柱动态安全性已成为重中之重。可以说,在一般深井或超深井中,“井眼轨迹控制—提速—钻柱安全”是一个基本被人们所默认的重要性顺序,但在特深井中,这一顺序应该变为“钻柱安全—井眼轨

迹控制—提速”。著名的前苏联所钻全世界最深直井—SG-3 井(12262 m),费时约 23 年,虽然是多种因素造成,但 27 次断钻具及 12 次侧钻是最关键的原因。然而细品钻柱动力学的发展历程,目前针对特深井钻柱动力学的研究并没有涉及其本质。超长细比(万米钻柱的长细比可能接近  $10^6$ )特征引起的超柔特性、钻柱振动规律的沿程变化特征、钻柱与井壁碰摩特征的随机性、粘滑振动的深度效应及传递规律、多工具引起的混合激励的耦合以及 HFTO 的产生机制及抑制方法等,都需要进一步探索。因此,可以说,超万米特深井的钻探面临的是科学和深层油气资源探索的需要,而超万米特深井安全、高效钻井给钻柱动力学研究提出了新的挑战。

致谢:成文过程中得到程载斌、薛启龙等专家的帮助,特此感谢。同时,感谢国家自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [1] 韩志勇. 液压环境下的油井管柱力学[M]. 北京:石油工业出版社,2011. [HAN Z Y. Well string mechanics in hydraulic environment[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [2] 高德利,黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展[J]. 力学进展,2021,51(3): 620-647. [GAO D L, HUANG W J. Some research advances in downhole tubular mechanics and control methods[J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 620-647.]
- [3] 李子丰. 油气井杆管柱力学研究进展与争论[J]. 石油学报,2016,37(4): 531-556. [LI Z F. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 531-556.]
- [4] FINNIE I, BAILEY J J. An experimental study of drill-string vibration[J]. Journal of Engineering for Industry, 1960, 82(2): 129-135.
- [5] BAILEY J J, FINNIE I. An analytical study of drill-string vibration[J]. Journal of Engineering for Industry, 1960, 82(2): 122-127.
- [6] PASLAY P R, BOGY D B. Drill string vibrations due to intermittent contact of bit teeth[J]. Journal of Engineering for Industry, 1963, 85(2): 187-194.
- [7] SKAUGEN E. The effects of quasi-random drill bit vibrations upon drillstring dynamic behavior[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1987, SPE-16660-MS: 105-116.
- [8] 王珍应,徐铭陶. 钻柱纵向受迫振动的广义传递矩阵法[J]. 石油学报,1990,11(3): 107-114. [WANG Z Y, XU M T. Computing forced longitudinal vibration of drill string by generalized transfer matrix method[J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(3): 107-114.]
- [9] 刘清友,马德坤,汤小文. 钻柱纵向振动模型的建立及求解方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),1998,20(4): 55-58. [LIU Q Y, MA D K, TANG X W. The method of solution and establishment for axial vibration model of drilling string[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 1998, 20(4): 55-58.]
- [10] NAGANAWA S. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 82: 140-150.
- [11] 李子丰,张永贵,侯绪田,等. 钻柱纵向和扭转振动分析[J]. 工程力学,2004,21(6): 203-210. [LI Z F, ZHANG Y G, HOU X T, et al. Analysis of longitudinal and torsion vibration of drillstring[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 203-210.]
- [12] 狄勤丰,骆大坤,周星,等. 横向主动控斜力作用下底部钻具组合动力学特征[J]. 石油学报,2023,44(9): 1552-1561, 1573. [DI Q F, LUO D K, ZHOU X et al. Analysis of dynamic characteristics of bottom hole assembly under transverse active deviation control force[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1552-1561, 1573.]
- [13] DAREING D W, LIVESAY B J. Longitudinal and angular drill-string vibrations with damping[J]. Journal of Engineering for Industry, 1968, 90(4): 671-679.
- [14] DAREING D W. Guidelines for controlling drill string vibrations[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1984, 106(2): 272-277.
- [15] KHAN K Z. Longitudinal and torsional vibration of drill strings[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [16] 王珍应,徐铭陶. 计算钻柱扭转振动的传递矩阵法[J]. 石油机械,1989,17(5): 13-18. [WANG Z Y, XU M T. Computing torsional

- vibration of drillstring by the transfer matrix method[J]. *China Petroleum Machinery*, 1989, 17(5): 13–18.]
- [17] 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 Q Y, MA D K, ZHONG Q. A drilling string torsional vibration model and its solution[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(2): 78–82.]
- [18] HUANG T, DAREING D W. Buckling and lateral vibration of drill pipe[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1968, 90(4): 613–619.
- [19] 高宝奎, 高德利. 深井钻柱的横向振动浅论[J]. *石油钻采工艺*, 1996, 18(4): 8–14. [GAO B K, GAO D L. Lateral vibration of drill stem in deep well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1996, 18(4): 8–14.]
- [20] 屈展. 井下温度对钻柱横向振动固有频率的影响[J]. *石油机械*, 1997, 25(8): 41–42. [QU Z. Influence of downhole temperature on inherent frequency of drillstring lateral vibration[J]. *China Petroleum Machinery*, 1997, 25(8): 41–42.]
- [21] HEISIG G, NEUBERT M. Lateral drillstring vibrations in extended-reach wells[C]. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2000, SPE-59235-MS: 1–11.
- [22] 李茂生, 闫相祯, 高德利. 钻井液对钻柱横向振动固有频率的影响[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(6): 68–71. [LI M S, YAN X Z, GAO D L. Influence of drilling fluid on natural frequency of drill string lateral vibration[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2004, 28(6): 68–71.]
- [23] 韩春杰, 阎铁, 毕雪亮, 等. 钻柱横向振动规律及应用[J]. *大庆石油学院学报*, 2004, 28(1): 14–16. [HAN C J, YAN T, BI X L, et al. Rules and their application of drilling string lateral vibration[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(1): 14–16.]
- [24] ELSAYED M A, RAYMOND D W. Analysis of coupling between axial and torsional vibration in a compliant model of a drillstring equipped with a PDC bit[C]. *Engineering Technology Conference on Energy*, 2002, 3591: 897–904.
- [25] SAMPAIO R, PIOVAN M T, LOZANO G V. Coupled axial/torsional vibrations of drill-strings by means of non-linear model[J]. *Mechanics Research Communications*, 2007, 34(5–6): 497–502.
- [26] CHI A, ZHANG J, GE W, et al. Prediction of drillstring fatigue life under axial-torsional-combined vibration[C]. *SPE Unconventional Resources Conference/Gas Technology Symposium*, 2006: SPE- 99356-MS, 1–5.
- [27] VORONOV S A, GOUSKOV A M, KVASHNIN A S, et al. Influence of torsional motion on the axial vibrations of a drilling tool[J]. *Journal of Computational & Nonlinear Dynamics*, 2007, 2(1): 58–64.
- [28] 孟庆华, 刘清友. 气体钻井钻柱轴扭耦合动态屈曲数学建模与求解[J]. *数学的实践与认识*, 2011, 41(15): 112–116. [MENG Q H, LIU Q Y. Establishment of extensional-torsional coupled dynamic buckling mathematical model of drilling string in gas drilling and its solution[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2011, 41(15): 112–116.]
- [29] 王鸿雁, 肖文生, 刘忠砚, 等. 钻井过程中钻柱的横—扭耦合振动分析[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(1): 61–66. [WANG H Y, XIAO W S, LIU Z Y, et al. Analysis of lateral torsional coupled vibration of drill string during drilling process[J]. *Noise and Vibration control*, 2014, 34(1): 61–66.]
- [30] YIGIT A S, CHRISTOFOROU A P. Coupled torsional and bending vibrations of drillstrings subject to impact with friction[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 215(1): 167–181.
- [31] LEINE R I, VAN CAMPEN D H, KEULTJES W J G. Stick-slip whirl interaction in drillstring dynamics[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2002, 124(2): 209–220.
- [32] 张小柯, 狄勤丰. 钻柱涡动时弯扭组合交变应力下的强度计算[J]. *天然气工业*, 2004(07): 49–51. [ZHANG X K, DI Q F. Strength calculation of the whirled drillstring at flexural-torsional alternate stress[J]. *Natural Gas Industry*, 2004(07): 49–51.]
- [33] 付雷. 基于混沌理论的钻柱横扭耦合动力学特性分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011. [FU L. Study on coupled transverse and torsional dynamics of drill string based on chaotic theory[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2011.]
- [34] DUNAYEVSKY V A, ABBASSIAN F, JUDZIS A. Dynamic stability of drillstrings under fluctuating weight on bit[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1993, 8(02): 84–92.
- [35] CHRISTOFOROU A P, YIGIT A S. Dynamic modelling of rotating drillstrings with borehole interactions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 206(2): 243–260.
- [36] TRINDADE M A, WOLTER C, SAMPAIO R. Karhunen-loeve decomposition of coupled axial/bending vibrations of beams subject to impacts[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279(3–5): 1015–1036.
- [37] MAHYARI M F, BEHZAD M, RASHED G R. Drill string instability reduction by optimum positioning of stabilizers[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010, 224(3): 647–653.
- [38] 闫铁, 王雪刚, 李杉, 等. 钻柱轴向与横向耦合振动的有限元分析[J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(3): 39–42. [YAN T, WANG X G, LI S, et al. Finite element analysis of longitudinal and lateral coupled vibration of drillstring[J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(3): 39–42.]
- [39] 程载斌, 姜伟, 蒋世全, 等. 全井钻柱系统耦合振动多体动力学模型的建立与算例分析[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(4): 71–76. [CHENG Z B, JIANG W, JIANG S Q, et al. A multibody dynamical model and example analysis of full hole drilling for fully coupled vibration[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(4): 71–76.]
- [40] TANG L P, GUO B L, ZHU X H, et al. Stick-slip vibrations in oil well drillstring: A review[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2020, 39(4): 885–907.

- [41] BELOKOBYSKII S V, PROKOPOV V K. Friction-induced self-excited vibrations of drill rig with exponential drag law[J]. *Soviet Applied Mechanics*, 1982, 18(12): 1134–1138.
- [42] BRETT J F. The genesis of torsional drillstring vibrations[J]. *SPE Drilling Engineering*, 1992, 7(03): 168–174.
- [43] NAVARRO-LÓPEZ E M, CORTÉS D. Avoiding harmful oscillations in a drillstring through dynamical analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 307(1–2): 152–171.
- [44] ZHAO D, HOVDA S, SANGESLAND S. The effect of stick slip vibration on the backward whirl of bottom hole assembly in drill-string[C]. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2016, 49996, V008T11A042: 1–9.
- [45] RITTO T G, AGUIAR R R, HBAIEB S. Validation of a drill string dynamical model and torsional stability[J]. *Meccanica*, 2017, 52(11–12): 2959–2967.
- [46] YIGIT A S, CHRISTOFOROU A P. Coupled torsional and bending vibrations of actively controlled drillstrings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 234(1): 67–83.
- [47] JANSEN J D, VAN DEN STEEN L. Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drillstrings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 179(4): 647–668.
- [48] KOVALYSHEN Y. Understanding root cause of stick-slip vibration in deep drilling with drag bit[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2014, 67: 331–341.
- [49] RICHARD T, GERMA Y C, DETOURNAY E. Self-excited stick-slip oscillations of drill bits[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2004, 332(8): 619–626.
- [50] RICHARD T, GERMA Y C, DETOURNAY E. A simplified model to explore the root cause of stick-slip vibrations in drilling systems with drag bits[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 305(3): 432–456.
- [51] ZAMANIAN M, KHADEM S E, GHAZAVI M R. Stick-slip oscillations of drag bits by considering damping of drilling mud and active damping system[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 59(3–4): 289–299.
- [52] GERMA Y C, DENOËL V, DETOURNAY E. Multiple mode analysis of the self-excited vibrations of rotary drilling systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 325(1–2): 362–381.
- [53] GERMA Y C, VAN DE WOUW N, NIJMEIJER H, et al. Nonlinear drillstring dynamics analysis[J]. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 2009, 8(2): 527–553.
- [54] NANDAKUMAR K, WIERCIGROCH M. Galerkin projections for state-dependent delay differential equations with applications to drilling[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(4): 1705–1722.
- [55] 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(11): 58–60. [HAN C J, YAN T. Research on the “striking-slipping” law of drilling string in extended reach well[J]. *Natural Gas Industry*, 2004(11): 58–60.]
- [56] 牟海维, 王瑛, 韩春杰. 钻柱的粘滑振动规律分析[J]. *石油机械*, 2011, 39(3): 67–69. [MOU H W, WANG Y, HAN C J. Analysis of stick-slip vibration law of drill string[J]. *China Petroleum Machinery*, 2011, 39(3): 67–69.]
- [57] TANG L P, ZHU X H, QIAN X D, et al. Effects of weight on bit on torsional stick-slip vibration of oilwell drill string[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31: 4589–4597.
- [58] SADEGHI A N, ARİKAN K B, ÖZBEK M E. Modelling and controlling of drill string stick slip vibrations in an oil well drilling rig[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 216, 110759: 1–11.
- [59] KAPITANIAK M, VAZIRI V, CHÁVEZ J P, et al. Experimental studies of forward and backward whirls of drill-string[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 100: 454–465.
- [60] 史玉才, 王军, 朱江, 等. 下部钻柱反向涡动机理研究[J]. *石油钻探技术*, 2007, 35(5): 43–45. [SHI Y C, WANG J, ZHU J, et al. Research on backward whirling mechanism of bottom drillstring[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2007, 35(5): 43–45.]
- [61] CHEN S L, BLACKWOOD K, LAMINE E. Field investigation of the effects of stick-slip, lateral, and whirl vibrations on roller-cone bit performance[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2002, 17(01): 15–20.
- [62] 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 D L, GAO B K, GENG R P. Analysis of drillstring whirling[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1996, 18(6): 9–13.]
- [63] MELAKHESSOU H, BERLIOZ A, FERRARIS G. A nonlinear well-drillstring interaction model[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2003, 125(1): 46–52.
- [64] VIJAYAN K, VLAJIC N, FRISWELL M I. Drillstring-borehole interaction: backward whirl instabilities and axial loading[J]. *Meccanica: Journal of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 52: 2945–2957.
- [65] 王明杰, 狄勤丰, 王文昌, 等. 气体钻井钻柱动态应力特征[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 159–165. [WANG M J, DI Q F, WANG W C, et al. Dynamic stress analysis of drill string in gas drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 159–165.]
- [66] PATIL P A, TEODORIU C. A comparative review of modelling and controlling torsional vibrations and experimentation using laboratory setups[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 112: 227–238.
- [67] FRITZ R J. The effect of an annular fluid on the vibrations of a long rotor, Part 2—test[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1970, 92:

- 930–937.
- [68] MIHAJLOVIC N N, WOUW V D N N, HENDRIKS M M, et al. Friction-induced limit cycling in flexible rotor systems: an experimental drill-string set-up[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2006, 46: 273–291.
- [69] KHULIEF Y A, AL-SULAIMAN F A. Laboratory investigation of drillstring vibrations[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2009, 223(10): 2249–2262.
- [70] 章扬烈, 肖载阳, 端木纲. 旋转钻柱运动原理的研究[J]. *石油矿场机械*, 1988, 12(2): 1–7. [ZHANG Y L, XIAO Z Y, DUAN M G. Research on the motion principle of rotating drill string[J]. *Oil Field Equipment*, 1988, 12(2): 1–7.]
- [71] 管志川, 靳彦欣, 王以法. 直井底部钻柱运动状态的实验研究[J]. *石油学报*, 2003, 24(6): 102–106. [GUAN Z C, JIN Y X, WANG Y F. Experimental research on motion behavior of bottom drill string in straight hole[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(6): 102–106.]
- [72] COOLEY C H, PASTUSEK P E, SINOR L A. The design and testing of anti-whirl bits[C]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1992, SPE-24586-MS: 403–412.
- [73] CLAYER F, VANDIVER J K, LEE H Y. The effect of surface and downhole boundary conditions on the vibration of drillstrings[C]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro*, 1990: 431–442.
- [74] JANSEN J D. Non-linear rotor dynamics as applied to oilwell drillstring vibrations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 147(1): 115–135.
- [75] TUCKER W R, WANG C. An integrated model for drill-string dynamics[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 224(1): 123–165.
- [76] KHULIEF Y A, AL-NASER H. Finite element dynamic analysis of drillstrings[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 41(13): 1270–1288.
- [77] SHOR R J, DYKSTRA M W, HOFFMANN O J, et al. For better or worse: Applications of the transfer matrix approach for analyzing axial and torsional vibration[C]. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2015, D031S016R003: 1–24.
- [78] DE MORAES L P P, SAVI M A. Drill-string vibration analysis considering an axial-torsional-lateral nonsmooth model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 438: 220–237.
- [79] CHEN J, LIAO H, ZHANG Y, et al. A torsional-axial vibration analysis of drill string endowed with kinematic coupling and stochastic approach[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 198, 108157: 1–15.
- [80] 朱杰然, 邹德永, 李光泉, 等. 水平井钻柱—井壁摩擦诱导粘滑振动机理研究[J]. *石油机械*, 2021, 49(7): 31–36. [ZHU J R, ZOU D Y, LI G Q, et al. Research on mechanism of stick-slip vibration induced by friction between drill string and borehole wall in horizontal well[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(7): 31–36.]
- [81] 狄勤丰, 吴玉禄, 石向前. 预弯曲动力学防斜打快技术初探[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 86–89. [DI Q F, WU Y L, SHI X Q. Primary research on vertical and fast drilling technology with pre-bending dynamic method[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 86–89.]
- [82] KAVANAGH W K, IMAS L, THOMPSON H, et al. Genesis spar risers: Interference assessment and VIV model testing[C]. *Offshore Technology Conference*, 2000, OTC-11992-MS: 1–12.
- [83] 王宴滨, 高德利. 基于多自由度系统的深水钻井隔水管紧急解脱反冲响应[J]. *石油学报*, 2020, 41(10): 1259–1265. [WANG Y B, GAO D L. Recoil response of deepwater drilling riser during emergency disconnection based on a multi-degrees-of-freedom system[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(10): 1259–1265.]
- [84] MILLHEIM K K, APOSTAL M C. The effect of bottomhole assembly dynamics on the trajectory of a bit[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1981, 33(12): 2323–2338.
- [85] BIRADES M. Static and dynamic three-dimensional bottomhole assembly computer models[J]. *SPE Drilling Engineering*, 1988, 3(02): 160–166.
- [86] 帅健, 吕英民, 蔡强康. 全井中钻柱的有限元模型及应用[J]. *石油学报*, 1995, 16(1): 118–126. [SHUAI J, LV Y M, CAI Q K. Finite element model of the drill string in a whole well bore and its application[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(1): 118–126.]
- [87] DYKSTRA M W. *Nonlinear drill string dynamics*[D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1996.
- [88] RITTO T G, SOIZE C, SAMPAIO R. Non-linear dynamics of a drill-string with uncertain model of the bit-rock interaction[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2009, 44(8): 865–876.
- [89] 祝效华, 刘清友, 童华. 三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 288–291, 295. [ZHU X H, LIU Q Y, TONG H. Research on dynamic model of full hole drilling-string system with three-dimensional trajectory[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 288–291, 295.]
- [90] 胡以宝. 基于实际井眼轨迹的钻柱动力学特性有限元分析[D]. 上海: 上海大学, 2011. [HU Y B. Finite element analysis of dynamic characteristics of drillstring based on actual well path[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.]
- [91] 王明杰. 超深井钻柱动力学特性分析及动态安全性评价[D]. 上海: 上海大学, 2016. [WANG M J. Drillstring dynamic characteristics analysis and dynamic safety evaluation for ultra-deep well[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.]
- [92] CHEN L Y, DI Q F, LOU E B, et al. The visualization of rub-impact characteristics of drill string on casing[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 174: 1321–1331.

- [93] ZHANG H, DI Q F, LI N, et al. Measurement and simulation of nonlinear drillstring stick-slip and whirling vibrations[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2020, 125: 1–14.
- [94] DI Q F, QIN K, CHEN T, et al. An innovative method for studying the dynamic failure mechanism of box connection of stabilizer in large diameter wellbore of ultra-deep wells[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205, 108822: 1–9.
- [95] 张会增, 王名春, 周长所. 考虑钻头—岩石非线性相互作用的钻柱动力学研究[J]. *装备制造技术*, 2023(01): 62–63. [ZHANG H Z, WANG M C, ZHOU C S. Research on the dynamics of drillstring considering bit-rock nonlinear interaction[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2023(01): 62–63.]
- [96] 戎保, 芮筱亭, 王国平, 等. 多体系统动力学研究进展[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 178–187. [RONG B, RUI X T, WANG G P, et al. Developments of studies on multibody system dynamics[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 178–187.]
- [97] 程载斌. 旋转导向钻井工具系统的力学行为研究及应用[D]. 北京: 中海油研究总院, 2010. [CHENG Z B. Research of rotary directional drilling tool system and its application[D]. Beijing: CNOOC Research Institutes, 2010.]
- [98] 程载斌, 任革学, 李汉兴, 等. 定向钻井动力学与控制理论研究及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2021. [CHENG Z B, REN G X, LI H X, et al. Research of directional drilling dynamics and control theory and its application[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021.]
- [99] CHENG Z B, JIANG W, REN G X, et al. A multibody dynamical model for full hole drillstring dynamics[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 378: 91–96.
- [100] 程载斌, 姜伟, 任革学, 等. 全井钻柱系统多体动力学模型[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 753–758. [CHENG Z B, JIANG W, REN G X, et al. A multibody dynamical model of full-hole drillstring dynamics[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 753–758.]
- [101] 杨蔡进. 全井段钻井系统的多体动力学建模与仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. [YANG C J. Multibody dynamic modeling and simulation for full-hole drilling system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.]
- [102] WANG N, CHENG Z, LU Y, et al. A multibody dynamics model of contact between the drillstring and the wellbore and the rock penetration process[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(5): 1–12.
- [103] MA Y H, HONG D F, CHENG Z B, et al. A multibody dynamic model of the drilling system with drilling fluid[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(7): 1–16.
- [104] 刘佳鹏. 梁—管道及齿轮系统动力学的ALE快速求解算法及分析[D]. 北京: 清华大学, 2018. [LIU J P. An efficient algorithm for the dynamic simulation of beam-tube contacts and gear meshing based on ALE formulation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.]
- [105] CHEN K D, CHEN J Q, HONG D F, et al. Efficient and high-fidelity steering ability prediction of a slender drilling assembly [J]. *Acta Mechanica*, 2019, 230(11): 3963–3988.
- [106] 陈家琦. 滑动导向钻井系统动力学及钻进控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2021. [CHEN J Q. Research on dynamics and drilling control of the slide drilling system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.]
- [107] YANG C, DU J B, CHENG Z B, et al. Flexibility investigation of a marine riser system based on an accurate and efficient modelling and flexible multibody dynamics[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 207: 1–15.
- [108] COOK R L, NICHOLSON J W, SHEPPARD M C, et al. First real time measurements of downhole vibrations, forces, and pressures used to monitor directional drilling operations[C]. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 1989, SPE-18651-MS: 283–290.
- [109] ASHLEY D K, MCNARY X M, TOMLINSON J C. Extending BHA life with multi-axis vibration measurements[C]. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2001, SPE-67696-MS: 1–11.
- [110] BOWLER A, HARMER R, LOGESPARAN L, et al. Continuous high-frequency measurements of the drilling process provide new insights into drilling-system response and transitions between vibration modes[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2016, 31(02): 106–118.
- [111] MACPHERSON J D, MASON J S, KINGMAN J E E. Surface measurement and analysis of drillstring vibrations while drilling[C]. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 1993, SPE-25777-MS: 953–963.
- [112] MACPHERSON J D, JOGI P N, KINGMAN J E E. Application and analysis of simultaneous near bit and surface dynamics measurements[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2001, 16(04): 230–238.
- [113] LEDGERWOOD L W, HOFFMANN O J, JAIN J R, et al. Downhole vibration measurement, monitoring, and modeling reveal stick/slip as a primary cause of PDC-bit damage in today[C]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2010, SPE-134488-MS: 1–10.
- [114] ZANNONI S A, CHEATHAM C A, CHEN C K D, et al. Development and field testing of a new downhole MWD drillstring dynamics sensor[C]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1993, SPE-26341-MS: 269–283.
- [115] REBRIKOV A A, KOSCHENKOV A A, RAKINA A G, et al. The use of a sensor modules system for measuring drilling parameters in a bit, significantly reduces the construction time of wells in Eastern Siberia[C]. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, 2021, D041S022R001: 1–33.
- [116] COBERN M, WASSELL M E. Laboratory testing of an active drilling vibration monitoring & control system[C]. *Proceedings of the AADE National Technical Conference & Exhibition*, Houston, 2005: 1–14.
- [117] BlackBox High Frequency (HF) Tool | NOV. <https://www.nov.com/products/blackbox-high-frequency-hf-tool>[EB/OL].

- [118] 高岩, 陈亚西, 郭学增. 钻柱振动信号采集系统及谱分析[J]. 录井技术, 1998, 9(3): 44–51. [GAO Y, CHEN Y X, GUO X Z. The acquisition system for drill string vibration signals and the spectrum analysis[J]. Logging Technology, 1998, 9(3): 44–51.]
- [119] 管志川, 韩志勇, 王以法, 等. 井下钻柱受力实测接头研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(4): 29–32. [GUAN Z C, HAN Z Y, WANG Y F, et al. Development of a kind of device for measuring the force acted on drill string in borehole[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2002, 26(4): 29–32.]
- [120] 赖欣, 胡泽, 赖晓斌, 等. DSP在随钻井下管柱参数测量系统中的应用[J]. 中国仪器仪表, 2006, (6): 80–83. [LAI X, HU Z, LAI X B, et al. Application of DSP for measuring parameters system of pipe strings while drilling[J]. China Instrumentation, 2006, (6): 80–83.]
- [121] 翟小强, 王瑛, 刘伟, 等. 存储式井下振动测量工具的设计与室内试验[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 111–114. [ZHAI X Q, WANG Y, LIU W, et al. Design and laboratory test of memory downhole vibration measurement instrument[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 111–114.]
- [122] 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 X Q, DI Q F, LI N, 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.]
- [123] LI Y, XUE Q, WANG J, et al. Pattern recognition of stick-slip vibration in combined signals of drillstring vibration[J]. Measurement, 2022, 204: 1–18.
- [124] WANG C, XUE Q, HE Y, et al. Lithological identification based on high-frequency vibration signal analysis[J]. Measurement, 2023, 221: 1–14.
- [125] 贾衡天, 高文凯, 艾维平, 等. 随钻井下动态参数测量系统[J]. 电子测量技术, 2018, 41(15): 133–137. [JIA H T, GAO W K, AI W P, et al. Dynamic parameters measuring system for downhole drilling[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(15): 133–137.]
- [126] 吉玲, 王泽超, 贾建波, 等. 旋转导向仪器井下振动测量及其标定[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(11): 1–3. [JI L, WANG Z C, JIA J B, et al. Downhole vibration measurement for rotary steerable tool and calibration[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(11): 1–3.]
- [127] JAIN J R, OUESLATI H, HOHL A, et al. High-frequency torsional dynamics of drilling systems: an analysis of the bit-system interaction[C]. SPE/IADC Drilling Conference Proceedings, 2014: 1–13.
- [128] HOHL A, TERGEIST M, OUESLATI H, et al. Derivation and experimental validation of an analytical criterion for the identification of self-excited modes in drilling systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 342: 290–302.
- [129] PASTUSEK P, SULLIVAN E, HARRIS T. Development and utilization of a bit-based data-acquisition system in hard-rock PDC applications[C]. SPE/IADC Drilling Conference, 2007, SPE-105017-MS: 1–10.
- [130] OUESLATI H, JAIN J R, RECKMANN H, et al. New insights into drilling dynamics through high frequency vibration measurement and modeling[C]. Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2013: 1648–1662.
- [131] SHEN Y, CHEN W, ZHANG Z, et al. Drilling dynamics model to mitigate high frequency torsional oscillation[C]. Proceedings-SPE/IADC Drilling Conference, 2020: 1–22.
- [132] ZHANG Z, SHEN Y, CHEN W, et al. Continuous high frequency measurement improves understanding of high frequency torsional oscillation in North America land drilling[C]. Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2017: 1–15.
- [133] SUGIURA J, JONES S. A drill bit and a drilling motor with embedded high frequency (1600 Hz) drilling dynamics sensors provide new insights into challenging downhole drilling conditions[J]. SPE Drilling & Completion, 2019, 34(03): 223–247.
- [134] HALSEY G W, KYLLINGSTAD A, AARRESTAD T V, et al. Drillstring torsional vibrations: Comparison between theory and experiment on a full-scale research drilling rig[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1986, SPE-15564-MS: 1–10.
- [135] CHEN D C K, COMEAUX B, GILLESPIE G, et al. Real-time downhole torsional vibration monitor for improving tool performance and bit design[C]. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 2006, SPE-99193-MS: 1–9.
- [136] BAUMGARTNER T, VAN OORT E. Pure and coupled drill string vibration pattern recognition in high frequency downhole data[C]. Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2014: 1–23.
- [137] TIKHONOV V S, BUKASHKINA O S. A new model of high-frequency torsional oscillations (HFTO) of drillstring in 3-D wells[C]. SPE International Petroleum Technology Conference 2014, IPTC 2014-Innovation and Collaboration: Keys to Affordable Energy, 2014: 1–16.
- [138] CHEN W, SHEN Y, ZHANG Z, et al. Understand drilling system energy beyond MSE[C]. Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2019: 1–16.
- [139] ABEDRABBO N E, LINES L A. Finite element simulation of rotary steerable drilling systems advance understanding of damaging downhole shock and vibration[C]. NAFEMS World Congress, 2015: 1–16.
- [140] CHEN S, PROPEL C, LANNING C, et al. Mechanisms and mitigation of 3D coupled vibrations in drilling with PDC bits[C]. Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2021: 1–16.
- [141] TIPPLES R, KESHIYEV S, SHEIKHREZAEI K, et al. Bit design methodology to mitigate high-frequency torsional oscillation[C].

- Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2021: 1–19.
- [142] HOHL A, TERGEIST M, OUESLATI H, et al. Prediction and mitigation of torsional vibrations in drilling systems[C]. Proceedings-SPE/IADC Drilling Conference, 2016: 1–14.
- [143] HEINISCH D, WINKLER M, HEBRIG C, et al. High-frequency torsional oscillation laboratory testing of an entire bottom hole assembly[C]. SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2017: 1–21.
- [144] HEINISCH D, KUECK A, HERBIG C, et al. Middle east gas field case study proves step change in BHA reliability through new HFTO isolation tool[C]. SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2019: 1–13.
- [145] ZHANG Y, ZHANG H, CHEN D, et al. Comprehensive review of high frequency torsional oscillations (HFTOs) while drilling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering 2023, 220: 1–20.

(责任编辑 陈勉 编辑 马桂霞)