

大长径比钻柱非线性动力学研究进展与展望

尹浩^{1,2,3}, 梁健^{2,3}, 张华^{2,3}, 马琳^{2,3}, 李威^{2,3}, 王文^{2,3}, 王跃伟^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 3. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 天津 300399)

摘要: 钻柱长径比超过 50000 时呈现高度柔性及显著非线性特征, 轴向、横向、扭转振动相互耦合, 易引发黏滑、涡动、参数共振等问题, 严重影响特深井钻井安全与钻进效率。本文围绕大长径比钻柱极端几何特征引发的动力学难题, 系统梳理其非线性振动特性、动力学建模方法、振动控制策略及工程应用挑战。研究表明, 轴向、横向与扭转振动之间存在几何非线性耦合、边界非线性耦合及摩擦耦合, 诱发正反向涡动共存、黏滑多稳态等复杂现象; 有限元法与几何精确梁理论侧重高保真刻画, 但计算开销高昂; 模型降阶与数据驱动方法提升了计算效率, 却需谨慎处理对波传播效应的简化; 实验验证是检验模型的关键, 但缩尺外推修正仍是难题。当前研究在理论层面仍面临多模态能量传递机理、状态依赖时滞动力学、非光滑系统分岔理论三大科学问题, 在工程层面亟需攻克全井段高效预测、极限延伸动态评估等核心难题, 该领域未来将向多物理场耦合、随机可靠性分析、数据驱动与数字孪生相融合的智能动力学方向发展, 为提升超深层地质资源开发的安全性和经济性提供更坚实的科学支撑。

关键词: 钻柱; 钻柱动力学; 大长径比; 非线性振动; 黏滑; 涡动; 振动控制; 特深井

中图分类号: P634; TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0044-09

Research progress and prospects in nonlinear dynamics of drillstring with high slenderness ratio

YIN Hao^{1,2,3}, LIANG Jian^{2,3}, ZHANG Hua^{2,3}, MA Lin^{2,3}, LI Wei^{2,3}, WANG Wen^{2,3}, WANG Yuewei^{2,3}

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 3. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Tianjin 300399, China)

Abstract: When the slenderness ratio (L/D) of a drillstring exceeds 50000, it exhibits high flexibility and pronounced nonlinear characteristics. The coupled axial, lateral, and torsional vibrations easily induce issues such as stick-slip, whirling, and parametric resonance, severely compromising the drilling safety and efficiency of ultra-deep wells. Focusing on the dynamic challenges induced by the extreme geometric features of high-slenderness-ratio drillstrings, this paper systematically reviews their nonlinear vibration characteristics, dynamic modeling methods, vibration control strategies, and engineering application challenges. The review indicates that geometric, boundary, and friction nonlinear couplings exist among the axial, lateral, and torsional vibrations, inducing complex phenomena such as the coexistence of forward and backward whirling and stick-slip multi-stability; the finite element method and geometrically exact beam theory prioritize high-fidelity characterization but incur high computational costs; model order reduction and data-driven methods improve computational efficiency, yet the simplification of wave propagation effects requires careful handling; experimental validation is key to model verification, but extrapolation from scaled models to full-scale conditions remains challenging. Currently, research still faces three major scientific problems at the theoretical level: multi-modal energy transfer mechanisms, state-dependent time-delay dynamics, and bifurcation theory of non-smooth

收稿日期: 2026-05-08; 修回日期: 2026-06-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.005

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000902); 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20251200126/DD20242850)

第一作者: 尹浩, 男, 回族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工艺、钻具及信息化等方面研究工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, yhao@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 尹浩, 梁健, 张华, 等. 大长径比钻柱非线性动力学研究进展与展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 44-52.

YIN Hao, LIANG Jian, ZHANG Hua, et al. Research progress and prospects in nonlinear dynamics of drillstring with high slenderness ratio[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 44-52.

systems. At the engineering level, it is urgent to overcome core difficulties such as efficient full-wellbore prediction and dynamic evaluation of extended-reach limits. In the future, this field will evolve towards intelligent dynamics integrating multi-physics coupling, stochastic reliability analysis, data-driven approaches, and digital twins, providing solid scientific support for enhancing the safety and economic performance of ultra-deep geological resource development.

Key words: drillstring; drillstring dynamics; high slenderness ratio; nonlinear vibration; stick-slip; whirling; vibration control; ultra-deep well

0 引言

钻柱是连接地面钻机与井底钻头的核心传动机构,在钻井过程中承担传递扭矩、施加钻压、循环钻井液等多重功能。随着油气资源勘探开发逐步向深层、超深层和深海延伸,钻井深度不断突破,钻柱的长径比也急剧增大。以超万米深井为例,钻柱长度超过10 km,而直径通常仅为100~200 mm,长径比超过50000,是工程领域中长径比最为极端的柔性细长结构之一^[1]。

如此极端的长径比使钻柱具有高度的柔性,同时也带来了极为复杂的动力学问题。在超万米特深井中,钻柱的超长柔性导致其刚度急剧下降,在自重、钻压、扭矩和钻井液等多重载荷作用下极易发生大变形,产生大位移,钻柱非线性特征显著,其安全性面临严峻挑战。钻柱在钻进过程中受井底地层压力、摩擦、岩石硬度变化等多因素影响,受力状态极为复杂,产生轴向、横向及扭转等多种形式的振动,这些振动是影响钻具寿命和钻进效率的关键因素。尤其值得注意的是,这三种基本振动并非相互独立,即由于钻柱的柔性及钻头-岩石相互作用的非线性,它们之间存在强烈的耦合关系,激发了自激振动、参数共振等丰富的非线性动力学现象,严重制约了钻井效率和安全^[2]。

20世纪80年代以前,对钻柱动力学的研究多局限于单自由度或解耦的线性分析框架,难以揭示复杂井下振动的本质。1987—2010年,研究逐渐转向非线性耦合模型,开始关注黏滑、涡动等现象的产生机理。2010年以来,随着数值计算能力的飞跃和先进实验手段的应用,该领域进入了快速发展阶段:基于几何精确梁理论的高保真模型成功捕捉了钻柱的大变形和大转动行为,随机动力学方法被引入以处理摩擦力、岩石特性等参数的不确定性,主动控制策略和机器学习方法为该领域开辟了新的研究方向^[3]。

当长径比突破50000时,会涌现出一系列迥异

于常规钻柱的特殊动力学现象:轴向应力波沿钻柱的传播时间(秒级)已与钻井操作的响应时间可比拟,经典的“拟静态”载荷传递假设失效;系统固有频率急剧降低且模态间距缩小,在低频区即可形成密集模态簇,加剧了参数共振的风险;巨量分布接触使全井段非线性耦合模型的求解面临维度灾难。本文围绕“大长径比”这一极端几何特征所引发的钻柱动力学核心问题,从振动特性、建模方法、振动抑制策略及工程应用挑战与未来趋势等四个方面,对近年来的研究进展进行系统梳理和评述,以期为该领域的深入研究和工程实践提供参考。

1 大长径比钻柱的非线性振动特性

1.1 基本振动形式与耦合机理

钻柱组成如图1所示,主要包括钻头以上的稳定器、动力钻具、钻铤和钻杆等,在井下承受极其复杂的载荷,其振动行为主要表现为轴向振动、横向振动和扭转振动三种基本形式,且三类振动存在强非线性耦合,直接决定钻井效率与结构安全,如图2所示^[4-5]。

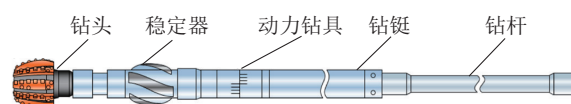


图1 钻柱组成示意

Fig.1 Schematic diagram of drillstring composition

1.1.1 轴向振动

轴向振动为钻柱沿井眼轴线方向的往复运动,核心激励源于钻头-岩石间歇性接触产生的周期性轴向冲击,以及钻柱纵向弹性波动传播效应。特深井钻柱长度可达万米级,纵向振动波长与结构特征长度相当,波动效应显著,导致钻柱各截面轴向力呈现剧烈时空分布特征。当轴向振动幅值超限,将诱发钻头跳钻现象:钻头周期性脱离井底,既大幅降低破岩效率,又产生强冲击载荷,加速钻头齿与轴承的疲劳失效。

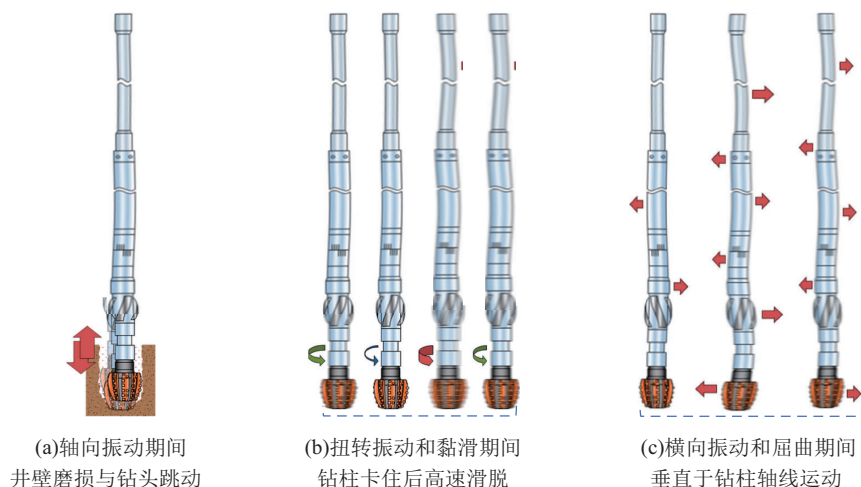


图2 钻柱振动模式及其产生的影响

Fig.2 Drillstring vibration modes and their effects

针对水平井钻井工况,Liu等^[6]建立钻柱轴向振动动态模型与载荷传递预测方法,揭示了轴向振动对水平井延伸极限的影响规律。研究证实,地表施加轴向振动可有效降低钻柱-井壁摩擦阻力,提升载荷传递效率与机械钻速。但对于长径比超50000的万米钻柱,轴向应力波单程传播时间长达2 s,地表补偿动作无法实时作用于钻头,必须构建含波动方程与时延边界条件的分布式参数模型,方可精准预测钻柱任意截面动态轴向载荷。

1.1.2 横向振动

横向振动表现为钻柱偏离井眼轴线的横向偏移运动,是钻井工程中危害最显著的振动形式。受井筒间隙限制,横向振动伴随钻柱与井壁的反复碰撞、摩擦,形成宽频激励,易激发高阶模态振动,最终引发钻柱疲劳断裂、过度磨损及井眼扩大等工程问题。

早期研究中,Graham等^[7]推导深海钻柱受迫横向运动动力学方程,奠定了横向振动理论基础。近年来研究聚焦于横向振动非线性特性及钻柱-井壁接触耦合关系:水平井与大位移井中,钻柱长期贴附井筒下侧,横向振动呈现独特“蛇行”涡动特征,当转速突破临界阈值,涡动行为将急剧加剧。

1.1.3 扭转振动

扭转振动为钻柱绕自身轴线的非匀速旋转运动,表现为转速周期性波动。黏滑振动是扭转振动最具破坏性的表现形式:钻头受高摩擦阻力周期性滞转,扭矩持续累积至临界值后突然高速释放,形

成剧烈转速冲击。扭转振动直接影响钻头破岩效率与底部钻具组合(BHA)可靠性,特深井万米钻柱的巨大转动惯量,进一步放大黏滑振动能量,使其破坏性显著增强。

1.1.4 三维非线性耦合效应

多向振动耦合是大长径比钻柱动力学的核心科学问题,其耦合机制主要源于三类非线性效应,共同构成系统强耦合本质。

(1)几何非线性耦合:横向振动引发的横向位移,使钻柱轴向长度产生“几何缩短”,数学上表现为轴向位移与横向位移的二次耦合项。该效应为钻柱系统固有属性,随长径比增大而愈发显著,即便小变形条件下,轴向与横向振动亦无法解耦。Dareing等^[8]系统分析纵向与角向振动的阻尼特性及耦合机制,为耦合振动研究搭建经典理论框架。

(2)边界非线性耦合:钻头-岩石界面相互作用同步产生轴向力与扭转力矩,二者通过岩石破碎机理强关联。Mao等^[9]构建聚晶金刚石复合片(PDC)钻头-岩石非线性相互作用模型,精准表征底部钻具组合非线性动力学特性,为BHA动力学分析提供新方法。

(3)摩擦耦合:基于Stribeck效应(摩擦系数随相对速度降低而增大),扭转振动与轴向振动通过摩擦力相互激发,实现振动能量的跨模态传递。

综合比较上述三类耦合机制可知:几何非线性耦合是系统内在耦合根源,边界非线性耦合是振动能量输入核心,主导黏滑等自激振动行为,摩擦耦

合则连接井壁接触与整体动力学响应。当前研究仍存在局限:多数模型仅考虑单一耦合效应,或采用唯象方法将耦合作用引入集中参数模型,缺乏兼具物理透明性与计算可行性的统一分析框架。面向大长径比钻柱的强柔性、非线性接触边界、钻头-岩石强非线性相互作用等特征,钻柱动力学理论正朝着高维度、高精度、全耦合方向持续深化^[10-13]。

1.2 钻柱-井壁接触与涡动行为

1.2.1 接触的非线性本质

钻柱与井壁的接触具有显著的非线性特征,是钻柱动力学建模中最具挑战性的环节之一。这一接触问题涉及多个层次的复杂性:接触发生的位置和时刻不可预知,属于典型的移动边界问题;接触力-位移关系呈现出非光滑的“间隙函数”特性,即当钻柱位移小于井筒间隙时不发生接触,一旦超出则突变为强非线性接触力;接触伴随的摩擦力依赖法向接触力,并且具有Stribeck效应等复杂的滑动-黏滞转换行为。

Melakhessou等^[14]聚焦钻柱与井壁的接触问题,重点分析了受压的底部钻具组合,指出弯曲和扭转效应及钻柱的涡动会显著影响接触力的分布模式,进而改变整个系统的动力学响应。

1.2.2 正向涡动与反向涡动的共存与转换机理

涡动是钻柱绕井眼轴线公转的一种运动模式,可分为正向涡动(公转方向与自转方向相同)和反向涡动(公转方向与自转方向相反)。其中,反向涡动对钻柱的危害尤为严重,该运动模式会显著加剧钻具的疲劳损伤并降低机械钻速^[15]。

Kapitaniak等^[16]开展了关于钻柱正向和反向涡动的实验研究,利用新型钻柱动力学实验平台,首次在实验条件下展示了正向和反向涡动运动模式的共存现象。这一发现证实了钻柱系统在相同操作参数下可能存在多种稳定状态,在工程实际中需要高度重视初始条件和扰动历史对最终运动状态的决定性影响。然而,该实验平台采用的是缩尺钻柱(长度约10 m,外径约30 mm),其长径比与真实万米钻柱相差2个数量级以上。缩尺实验中观察到的“正向-反向涡动共存区”在真实特深井中是否仍然存在,或者是否会因分布质量效应和波传播而被抑制或放大,目前尚无定论。这说明从缩尺实验到全尺寸数值模拟之间的外推鸿沟,也是未来实验研究需要突破的关键瓶颈。

1.2.3 涡动条件下的非线性稳定性与多稳态共存

钻柱系统的非线性本质决定了其可能存在多个稳定解,即“多稳态”现象。在相同的操作参数(转速、钻压等)下,钻柱可能处于无涡动的稳定旋转状态,也可能出现周期性涡动乃至混沌运动。这些状态之间可能存在分岔和跳变,且往往难以通过线性稳定性分析预测。

Christoforou等^[17]系统分析了钻柱的轴向和横向振动,揭示了参数共振现象的重要机制。通过对钻柱的近似降阶建模和特征值分析发现,即使在远低于经典屈曲临界载荷的钻井作业条件范围内,也可能同时发生参数共振和涡动,表现出混沌行为,进而参数激励,导致钻柱失稳。

1.3 轴向-扭转耦合振动及黏滑现象

1.3.1 钻头-岩石非线性相互作用与再生延时效应

黏滑振动是钻柱动力学中研究最为广泛的现象之一,但其物理机制仍存在诸多尚未阐明之处。钻头在“静止”和“滑移”之间的切换由钻头与岩石之间的摩擦曲线负斜率段驱动,这是黏滑现象产生的主要机制。然而,实际钻井中轴向和扭转振动的强耦合使这一简化模型变得极为复杂。

研究表明,PDC钻头与岩石的非线性相互作用模型对BHA动力学有重要影响。更为关键的因素是接触界面的“再生效应”:当钻头转速波动时,会在岩石表面留下起伏的切削痕迹,这些形貌将以时间延迟的方式影响后续的切削力,形成一个状态依赖的时间延迟闭环。研究人员发现轴向振动的位错型时间延迟容易引发系统不稳定,这类高度非线性的相互作用可显著改变系统的稳定性和能量利用效率^[18]。

1.3.2 黏滑过程的时滞动力学建模与稳定性分析

黏滑建模的关键在于对钻头-岩石摩擦和切削的精确物理描述及数学处理。采用集中参数模型的方法由于计算负担相对较低,尤其适用于参数研究和快速稳定性分析。基于集中参数模型,研究人员发现在一定摩擦特性下系统存在钻头完全卡死、稳定的黏滑极限扭转振动及平稳旋转三个共存状态,而其驻留的最终状态取决于初始条件,这一区域被称为多稳态区域。基于钻柱六自由度集中质量模型,可分析涵盖轴向、横向和扭转运动下的由切削岩层和钻柱内摩擦效应引起的不稳定性,为优化钻井参数奠定了理论基础^[19-20]。

1.3.3 井下多源激励与黏滑的最优操作窗口

黏滑现象的工程解决方案不仅在于控制策略本身,更在于调整钻井参数,使其避开黏滑发生的转速-钻压窗口。在多数工况下,井下并非仅有单一振源作用,泥浆马达的周期性输出力矩就是典型干扰源,会在钻柱中叠加周期性扭转激励。如果该激励频率恰好与钻柱某阶扭转固有频率重合,即使原本安全的转速也可能导致扭转失稳。

Dunayevsky 等^[21]对轴向激励引发的横向振动进行了理论分析,通过计算钻柱参数的稳定转速范围并绘制了振动“严重性”与转速的关系曲线,从工程意义上建立了最优操作窗口,即避开峰值对应的临界转速可显著降低横向振动水平。

2 大长径比钻柱的动力学建模方法

经过多年发展,钻柱动力学已形成解析法、集中参数法、有限元法、多体动力学法、高阶数值方法及实验测试等多类建模方法,各类方法在适用场景、计算精度与求解效率上差异显著。其中,有限元方法凭借高精度优势成为大长径比钻柱非线性动力学分析的主流手段,并衍生出几何精确梁等先进离散理论;为提升计算效率,模型降阶与数据驱动等加速技术得到广泛关注;实验验证则是保证数值模型可靠性的关键支撑。因此,本节重点围绕有限元与集中参数模型、几何精确梁理论、模型降阶与数据驱动方法、数值-实验一体化验证展开系统阐述。

2.1 有限元法与集中参数法

有限元法是钻柱动力学精细化仿真的主流工具,可系统考虑钻柱非均匀几何特征、材料非线性、复杂边界约束及非线性接触条件,适用于全井段钻柱或底部钻具组合的高精度动态分析。传统欧拉-伯努利梁、铁木辛柯梁单元均依托有限元框架实现离散求解,但受小变形假设限制,难以精准描述钻柱大转角、大曲率变形与强接触非线性问题。为此,学界进一步发展出几何精确梁理论、求积元法等高精度离散方案。针对常规井段小幅变形工况,普通梁单元有限元模型计算稳定,能够完成基础振动响应、固有特性求解。研究通过有限元仿真分析钻井液参数对钻柱横向振动的影响规律,得出结论:钻井液流量与密度提升会降低流体阻尼效应,进而加剧钻柱横向振动,该结论对现场钻井参

数优化具有重要指导价值^[22]。

集中参数法是工程应用中最常用的简化建模方法,将连续钻柱离散为集中质量、等效弹簧与阻尼单元,模型结构简洁、求解效率高,可实现全井段钻柱动力学快速求解,广泛应用于摩阻扭矩预测、扭转黏滑振动分析及钻井参数初选。但该方法忽略钻柱连续变形特征,难以精准刻画局部大变形与精细化接触状态,在大长径比、强非线性水平井仿真中精度受限,仅适用于工程快速估算。

2.2 几何精确梁理论的应用

传统欧拉-伯努利梁或铁木辛柯梁在处理钻柱大转动时受限于小变形假设,而大长径比钻柱在井下极易发生显著的大位移与大转动。几何精确梁理论从连续介质力学的客观性要求出发,利用旋转张量精确描述梁截面的转动,不再采用小转角近似,从而得到更真实的运动学描述。将旋转张量与求积元法结合构建的空间离散格式能有效避免传统有限元在处理梁大转动时常见的剪切闭锁等问题,适用于万米钻柱这类超长柔性结构的动态分析^[23]。

2.3 模型降阶与数据驱动建模

高保真有限元模型虽精度优异,但全井段瞬态仿真自由度庞大、计算成本极高,难以满足工程实时分析需求。模型降阶技术通过缩减系统自由度、保留关键非线性特性,实现计算效率与仿真精度的平衡。Liao 等^[24]构建的降阶模型可精准表征柔性钻柱径向、弯曲、扭转运动及钻柱-井壁黏滑相互作用,高效揭示系统动力学分岔与失稳规律。数据驱动建模为钻柱动力学提供了新路径,依托机器学习算法挖掘现场监测数据隐含的动力学规律,可构建数据驱动模型,为钻柱状态实时感知、故障预警提供技术支撑。

2.4 实验验证与数值仿真的一体化

实验研究是验证理论模型、揭示新机理的核心手段,是确保数值模型工程适用性的关键环节。阿伯丁大学 Wiercigroch 团队研发的钻井实验平台可真实再现黏滑振动、钻头弹跳、横向振动等典型振动形式,采用工业钻头与真实岩样实现理论模型与实验结果的定量对标^[25-27]。当前,数值仿真与实验验证迭代融合已成为钻柱动力学研究的核心模式,通过深井、大位移井等真实工况下的实验检验,可有效修正模型参数、提升预测可靠性。

综上,有限元法与几何精确梁理论可实现高保真建模,但计算成本较高;模型降阶与数据驱动方法显著提升计算效率,需谨慎处理应力波传播等动态特性简化;实验验证是模型校准的核心依据,缩尺效应与外推精度仍需优化。未来钻柱动力学建模将向多保真度混合驱动方向发展:在BHA等强非线性区域采用几何精确梁高精度建模,上部钻柱采用降阶模型提升效率,结合实验数据在线校准,实现精度、效率与工程适用性的协同统一。

3 钻柱振动抑制与控制策略

3.1 被动控制策略

被动控制策略不需要外部能量输入,通过优化钻柱的结构设计或增加被动耗能元件来抑制振动,具有可靠性高、成本低的优势,在钻井现场得到广泛应用,主要包括稳定器优化、减摩工具等。

稳定器的优化布置是最为常见且有效的被动控制手段之一。Mahyari等^[28]以最大限度减小振动并承受最大钻压为目标,提出了稳定器的最优位置确定方法。通过模式叠加法将连续系统的势能离散化为多自由度系统,并求根确定平衡位置和稳定性,为工程应用中的稳定器配置提供了科学依据。

减摩工具则利用机械原理将滑动摩擦转化为滚动摩擦或提供辅助推力。Long等^[29]研究发现,通过在地表对钻柱施加轴向振动能够显著减小钻柱与井壁之间的摩擦,提高载荷传递效率、机械钻速和水平井的延伸极限。

3.2 主动控制与软扭矩控制

主动控制涉及实时监测并施加反向控制信号以抑制不稳定振动,尤其适用于黏滑这类自激振动。软扭矩控制是解决黏滑问题的主流策略之一:系统实时采集钻柱扭矩信号,一旦识别到黏滑现象,便主动调节顶驱转速指令,抑制扭转振动。

研究表明,在缩尺实验钻柱装置上实现的动态滑模控制器可以显著降低扭转振动的幅值,提升操作稳定性和钻进速度^[30]。此外,Sharma等^[31]系统总结了扭转振动的主动控制与机器学习策略,涵盖了反馈控制和各种数据驱动的自适应控制框架,为钻柱振动控制从传统PID迈向智能控制提供了技术路线。

3.3 智能与自适应控制策略

近年来,控制策略与机器学习方法的融合成为

研究前沿。传统控制器依赖精确的数学模型,而机器学习可以从海量的现场数据中提取规律,实现更为灵活和自适应的控制。在井下环境极端、模型参数(如摩擦力)具有高度不确定性的背景下,强化学习方法在虚拟仿真环境中通过迭代优化控制策略,有望解决钻柱非线性动力学的不确定性控制难题。同时,数字孪生概念的兴起也为主动控制提供了新的实现途径,即将高保真动力学模型与实际传感器数据实时对齐,在虚拟空间中预测系统的未来状态并提前采取控制行动^[32]。

上述策略中,软扭矩控制在工业界取得了最广泛的应用,但其本质是线性PID控制器的变体,在处理高度非线性的黏滑现象时存在固有局限,即当钻柱因参数变化从黏滑极限环跳变到平稳旋转状态时,固定的PID参数往往无法兼顾两种状态的控制品质;相比之下,滑模控制等非线性方法在理论上具有更强的鲁棒性,但其对高频未建模动态的敏感性限制了其在现场的应用;智能与自适应控制代表了未来的方向,但目前仍以仿真研究为主,距现场大规模应用尚有距离。

4 工程应用挑战与未来发展趋势

4.1 万米特深井的动力学挑战

万米级特深井代表着钻柱动力学研究的极限工况,其核心挑战源于“极致长径比”引发的系列尺度效应。首先,波传播滞后与分布载荷效应:钻柱长度超过10 km,自重产生的轴向拉力在顶部已高达数千千牛,而底部钻压却仅能传递几十千牛,显著改变其动力特性,同时,轴向弹性波的传播时长与钻井操作响应时长处于同一量级,经典静态分析方法不再适用。其次,模态密集化与参数共振风险:随着钻柱长度增加,系统固有频率向低频区移动且模态间距急剧缩小,在0~10 Hz的低频范围内可能出现数十阶轴向或扭转模态,意味着钻井过程中任何周期性激励(如三牙轮钻头的冲击频率、泥浆马达的输出脉动)都极易与某一阶模态耦合,激发难以预测的参数共振。再次,失效模式的尺度上移:涡动和黏滑现象可从BHA区域向上扩展,引起中部钻柱产生显著的横向和扭转振动失稳,导致常规设计中认为安全的管段发生意外疲劳断裂^[33]。因此,建立能够准确预测全井段动力学行为,特别是捕捉上述尺度效应的高保真模型是该领域的核

心挑战。

4.2 水平井/大位移井与摩阻管理

水平井中的钻柱动力学与直井存在本质差异。钻柱因重力作用贴靠于井筒下侧,形成持续接触,摩阻和扭矩管理成为限制水平段延伸长度的核心因素。钻柱在水平段旋转时受到分布式的摩擦力、扭转力矩和接触压力,使得轴向载荷无法有效传递至钻头。动态摩阻和扭矩模型及瞬态水力学与动力学分析耦合成为近年来的发展趋势,服务于钻井可行性评估与井眼轨迹优化^[34]。

4.3 深水钻井与双管柱系统

深水钻井中数百甚至千米的海水层显著增加了钻柱的悬垂长度和水动力载荷。波浪、洋流、船体运动共同作用在隔水管和钻柱上,产生周期性的横向激励和纵向运动。双井架并行作业时,两根独立管柱之间的水动力相互作用进一步加剧了系统的复杂性^[35]。近年来,针对深水双井架钻井中平行管柱机械干涉的研究成果为安全作业窗口的确定提供了关键支撑^[36]。

4.4 多物理场耦合建模

未来钻柱动力学模型将越来越多地向热-流-固-化学耦合方向发展。钻柱在井下承受着从井底高温高压到井口常温常压的巨大温度梯度,引起热膨胀和材料性能变化。钻井液在钻柱内外的高速流动产生流体附加质量、阻尼和激励,该流-固耦合效应在深水钻井和气体钻井中都极其显著。对钻柱全生命周期的研究还需耦合腐蚀等化学效应及磨损等力学效应。此类多物理场的耦合模型将提升对井下复杂动态行为的认知深度^[37]。

4.5 从不确定性量化到可靠性评估

钻柱动力学面临多种不确定性来源:岩石力学参数、摩擦系数、钻进速度、井眼轨迹等本质上都具有统计随机性。传统的确定性模型常给出乐观或偏保守的预测,无法量化结果的置信度。随机动力学方法通过将关键参数视为随机变量或场,在概率框架下评估钻柱系统的动态可靠性。Ritto等^[38]采用指数型自相关函数的随机场模型处理摩擦系数的不确定性,发现动态响应的概率分布可能在均值附近呈现显著的分散性,这直接关系到钻柱疲劳寿命的概率评估和钻井作业的风险管理。基于首次超越破坏准则的动态可靠性分析已被引入钻柱系统的定量风险评估中。

4.6 数据驱动与数字孪生赋能智能钻井

大数据和人工智能为钻柱动力学研究开辟了新的方向。(1)机器学习可用于直接学习钻柱动力学中的非线性映射关系,构建代理模型,大幅提高计算速度;(2)基于实际钻井数据,通过数字孪生技术将高保真物理模型与实时传感器数据动态融合,在虚拟空间中同步反映真实钻柱的状态并预测其未来演变。在智能钻井的框架下,数字孪生与自动控制系统结合形成一个闭环,即实时优化的钻井参数自动下发至顶驱,实现无人或少人干预下的安全高效钻进。这是钻柱动力学从学术研究走向工业智能化应用的重要桥梁^[39-40]。

5 结论

(1)大长径比钻柱的动力响应已不再表现为局部BHA区域的“扰动”,而是全井段的“波动”与“耦合”。经典理论中用于解耦轴向、横向、扭转振动的假设(如小变形、瞬时载荷传递、低阶模态主导)在万米深井、水平大位移井和深水钻井中均不同程度失效。轴向应力波的传播滞后、模态密集化、分布接触的非线性增强是区别于常规钻柱动力学的三大核心尺度效应。

(2)当前研究已成功建立了几何精确梁、非线性接触力学和时滞微分方程等先进理论框架,能够定性和半定量地解释涡动共存、黏滑多稳态等现象。然而,因高保真模型计算成本过高且模型降阶技术尚未成熟,以及关键参数(摩擦系数、岩石破碎比能)的现场原位测量手段缺失而导致模型输入存在较大不确定性,现有模型多数停留在“解释现象”层面,缺乏对万米全井段动态响应的“定量预测”能力。

(3)综合前面对非线性振动特性的剖析和对建模方法的评述,当前大长径比钻柱动力学研究在理论层面仍面临三项亟待突破的核心科学问题。①多模态耦合与能量传递机制:长径比超50000时,系统低频区形成密集模态簇,宽频激励下能量在数十阶模态间传递、竞争并诱发特定模态失稳,需揭示其能量流规律。②状态依赖时滞系统动力学:钻头再生切削形成状态依赖时滞,轴向应力波传播引入分布参数时滞,两类时滞共存耦合构成混合系统,需建立统一理论阐明双重时滞对稳定性与分岔的交互影响。③高维非光滑系统分岔与多稳态控制:

钻柱-井壁接触的非光滑间隙特性使相空间分区,系统存在多稳态(无涡动、周期性涡动、混沌、黏滑等),需发展非光滑全局分岔理论,揭示多稳态吸引域与跳变条件,为全局稳定控制提供依据。

(4)实现大长径比钻柱动力学从理论分析走向工程实践,必须攻克四项核心工程难题。①万米深井全井段高效预测:高保真模型因离散单元多、接触判断频繁而计算成本过高,需发展模型降阶、数据驱动代理模型或并行计算,实现24 h实时动态模拟。②水平井极限延伸动态评估:振动与摩阻形成闭环耦合,静态模型失效,需建立耦合三向振动的瞬态摩阻模型,从能量耗散角度预测极限延伸长度。③深水双管柱水动力-动力学耦合分析:外部流场与柔性管柱双向耦合且双管柱相互干扰,现有解耦分析不足,需构建全耦合模型以确定安全作业窗口。④井下实时感知与数字孪生构建:井下极端环境使高带宽、低漂移测量成为瓶颈,需研发耐高温高压传感器,并构建物理模型与数据融合的数字孪生体,实现状态同步与主动抑制。

(5)展望未来,面向万米特深井、水平井、大位移井和深水钻井等极端工程需求,钻柱动力学研究将向着多物理场全耦合建模、随机动力学与可靠性分析、数据驱动与物理模型深度融合的智能动力学方向持续发展,这将为提升超深层地质资源开发的安全性和经济性提供坚实的科学依据和技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 张金昌,刘秀美.13000m科学超深井钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):1-6.
ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m drilling technology of super-depth scientific drilling-well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(9):1-6.
- [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 Deli, HUANG Wenjun. Some research advances in down-hole tubular mechanics and control methods[J]. Advances in Mechanics, 2021,51(3):620-647.
- [3] 狄勤丰,杨赫源,王文昌,等.钻柱动力学研究进展及发展趋势[J].石油科学通报,2024,9(2):224-239.
DI Qinfeng, YANG Heyuan, WANG Wenchang, et al. Research advances and development trend of drill string dynamics[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024,9(2):224-239.
- [4] Dong G J, Chen Y J, Fu J H, et al. The drillstring dynamic frequency domains modes and mode shapes characteristics of compound drilling for the high-quality slim borehole[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023,48(30):11322-11332.
- [5] Maitra E K, Al dushaishi M F. Laboratory-scale drillstring vibration analysis[J]. Mining, 2025,5(4):78.
- [6] Liu W L, Ni H J, Wang Y, et al. Dynamic modeling and load transfer prediction of drill-string axial vibration in horizontal well drilling[J]. Tribology International, 2023,177:107986.
- [7] Graham R D, Frost III M A, Wilhoit J C Jr. Analysis of the motion of deep-water drill strings-part 1: forced lateral motion[J]. Journal of Engineering for Industry, 1965,87(2):137-144.
- [8] 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.
- [9] Mao L J, Ma M Y, Cai M J. Research on the dynamics of drill-string considering bit-rock nonlinear interaction[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2023,148:104301.
- [10] 冯群芳,侯勇俊,方潘,等.斜井下钻柱系统横-扭耦合非线性动力学特性[J].机械科学与技术,2025,44(5):759-767.
FENG Qunfang, HOU Yongjun, FANG Pan, et al. Exploring lateral-torsional coupled nonlinear dynamic characteristics of drilling string system in an inclined well[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025,44(5):759-767.
- [11] Doghmane M Z. Natural frequency analysis of a stepped drill string in vertical oil wells subjected to coupled axial-torsional-lateral vibrations[J]. Energies, 2025,18(13):3492.
- [12] Meddah S, Tadjer S A, Idir A, et al. Dynamic interaction analysis of coupled axial-torsional-lateral mechanical vibrations in rotary drilling systems[J]. SDHM Structural Durability and Health Monitoring, 2024,19(1):77-103.
- [13] Fang P, Ding S J, Yang K, et al. Dynamics characteristics of axial-torsional-lateral drill string system under wellbore constraints[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2022,146:104176.
- [14] Melakhessou H, Berlioz A, Ferraris G. Nonlinear model for dynamic behavior of drill-string[C]//ASME 2002 Engineering Technology Conference on Energy. Houston: ASME, 2002:989-996.
- [15] Mason J S, Sprawls B M. Addressing BHA whirl: the culprit in mobile bay[J]. SPE Drilling & Completion, 1998,13(4):231-236.
- [16] Kapitaniak M, Vaziri V, Pérez Chávez J, et al. Experimental studies of forward and backward whirls of drill-string[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018,100:454-465.
- [17] 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.
- [18] Nandakumar K, Wiercigroch M. Stability analysis of a state dependent delayed, coupled two DOF model of drill-string vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013,332(10):2575-2592.
- [19] 谢豆,伍沁瑶,库伦元,等.钻柱纵-扭耦合非线性振动试验与数值模拟研究[J].机械工程学报,2025,61(23):134-144.
XIE Dou, WU Qinyao, SHE Lunyuan, et al. Experimental and numerical simulation research on the nonlinear coupled longitudinal-torsional vibration of a drill-string[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025,61(23):134-144.
- [20] Aarsnes U J F, van de Wouw N. Dynamics of a distributed

- drill string system: characteristic parameters and stability maps [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 417: 376–412.
- [21] 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.
- [22] Xie D, Huang Z Q, Ma Y C, et al. Nonlinear dynamics of lump mass model of drill-string in horizontal well [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 174: 105450.
- [23] Han Y W, Ai Z J, Kuang Y C, et al. Nonlinear dynamic modeling of drill string in horizontal well—A geometrically exact approach [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 172: 1133–1152.
- [24] Liao C M, Balachandran B, Karkoub M, et al. Drill-string dynamics: reduced-order models and experimental studies [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2011, 133(4): 041008.
- [25] Al Shekaili A. Numerical and experimental investigation of nonlinear drillstring dynamics of downhole drilling [D]. Exeter: University of Exeter, 2025.
- [26] Kuang Y C, Lin W, Liu Y, et al. Numerical modelling and field experimental validation of the axial load transfer on the drill-strings in deviated wells [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 75: 103124.
- [27] Kapitaniak M, Vaziri Hamaneh V, Pérez Chávez J, et al. Unveiling complexity of drill-string vibrations: experiments and modelling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 101/102: 324–337.
- [28] 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.
- [29] Long Y, Wang X Y, Wang P, et al. A method of reducing friction and improving the penetration rate by safely vibrating the drill-string at surface [J]. *Processes*, 2023, 11(4): 1242.
- [30] Zhang Y L, Xu B C, Chen Y Q, et al. A zone predictive safety filter for drill string torsional vibrations control considering measurement delay and data loss [J]. *Control Engineering Practice*, 2025, 165: 106561.
- [31] Sharma A, Abid K, Srivastava S, et al. A review of torsional vibration mitigation techniques using active control and machine learning strategies [J]. *Petroleum*, 2024, 10(3): 411–426.
- [32] Sui D, Chen J K. Robust control of drillstring vibrations: modeling, estimation, and real-time considerations [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(24): 13137.
- [33] 祝效华. 深层超深层油气钻井提速研究与展望 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(3): 1–9.
- ZHU Xiaohua. Researches on and prospect of ROP improvement in deep and ultra-deep oil and gas drilling [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2025, 47(3): 1–9.
- [34] Heisig G, Neubert M. Lateral drillstring vibrations in extended-reach wells [C]//IADC/SPE Drilling Conference. New Orleans: IADC/SPE Drilling Conference, 2000: SPE-59235-MS.
- [35] Liu X Q, Shi Y, Li Y W, et al. Mechanical interference properties of two parallel strings in a deepwater dual-derrick drilling system [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 269: 113720.
- [36] Mao L J, Zheng Q, Fu Q, et al. Dynamic analysis of a drilling string for deepwater riserless drilling with vortex-induced vibration considered [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 301: 117325.
- [37] Dvergsnes E W, Cayeux E. On the importance of the coupling between transient mechanical, hydraulic and thermal effects for the modelling of real-time drilling operations [C]//ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Glasgow: ASME, 2019: V008T11A005.
- [38] Ritto T G, Escalante M R, Sampaio R, et al. Drill-string horizontal dynamics with uncertainty on the frictional force [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(1): 145–153.
- [39] Sui D, Sahebi H, Hetland A. Rate of penetration optimal control considering drillstring vibration via data analytics [C]//ASME 2025 44th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vancouver: ASME, 2025: V006T11A024.
- [40] Wang H G, Gao B, Zheng Y C, et al. Research progress of machine learning in drill string vibration recognition and prediction [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(1): 149–158.

(编辑 王跃伟)