



深层超深层油气安全高效开发若干关键问题与新型解决方案

柳贡慧 查春青 陈添 汪伟

Several Key Issues in Deep and Ultra-Deep Oil and Gas Development and Corresponding New Solutions

LIU Gonghui, ZHA Chunqing, CHEN Tian, WANG Wei

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海相碳酸盐岩超深油气井安全高效钻井关键技术

Key Technologies for Safe and Efficient Drilling of Marine Carbonate Ultra-Deep Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2019, 47(3): 25–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019062>

川东南地区深层页岩气钻井关键技术

Key Drilling Technology for Deep Shale Gas Reservoirs in the Southeastern Sichuan Region

石油钻探技术. 2018, 46(3): 7–12 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018073>

川南海相深层页岩气钻井关键技术

Key Technologies for Deep Marine Shale Gas Drilling in Southern Sichuan

石油钻探技术. 2019, 47(6): 9–14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019118>

深层油气勘探开发需求与尾管悬挂器技术进步

The Demands on Deep Oil/Gas Exploration & Development and the Technical Advancement of Liner Hangers

石油钻探技术. 2019, 47(3): 34–40 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019055>

深层油气井井筒完整性检测方法

A Method for Wellbore Integrity Detection in Deep Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2021, 49(5): 114–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021127>

“三超”油气井井控技术难点及对策

Technological Challenges and Countermeasures in Well Control of Ultra-Deep, Ultra-High Temperature and Ultra-High Pressure Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2017, 45(4): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704001>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024002

引用格式: 柳贡慧, 查春青, 陈添, 等. 深层超深层油气安全高效开发若干关键问题与新型解决方案 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 1-7.
LIU Gonghui, ZHA Chunqing, CHEN Tian, et al. Several key issues in deep and ultra-deep oil and gas development and corresponding new solutions [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 1-7.

深层超深层油气安全高效开发若干关键问题与 新型解决方案

柳贡慧^{1,2}, 查春青¹, 陈添², 汪伟¹

(1. 北京工业大学机械与能源工程学院, 北京 100124; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘 要: 深层超深层油气资源是我国油气资源的重要接替区和重点勘探开发领域, 现已成为保障国家能源安全的重要战略资源。深层超深层油气安全高效开发面临诸多挑战, 井下复杂工况识别难、套管破损严重、长水平段托压严重和井眼轨迹控制难等关键问题尤为突出, 亟待解决。为此, 针对深层超深层油气开发所面临的关键问题, 在分析传统解决方案局限性的基础上, 提出了具有显著优势的新工具和新技术, 为深层超深层油气的安全高效开发提供了有效的技术方案支持, 也为深层超深层钻完井技术发展提供了新的方向。

关键词: 深层; 超深层; 提速提效; 井眼轨迹控制; 套管修复; 工况识别

中图分类号: TE921 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)02-0001-07

Several Key Issues in Deep and Ultra-Deep Oil and Gas Development and Corresponding New Solutions

LIU Gonghui^{1,2}, ZHA Chunqing¹, CHEN Tian², WANG Wei¹

(1. School of Material and Manufacturing, Beijing University of Technology; 2. Petroleum Engineering College, China University of Petroleum (Beijing))

Abstract: Deep oil and gas resources are important replacement areas and key exploration and development areas of China's oil and gas resources and have become an important strategic resources to ensure national energy security. The safe and efficient development of deep and ultra-deep oil and gas is faced with many challenges. The four key problems are difficult to identify complex downhole conditions, serious casing damage, severe weight-on-bit congestion in long horizontal sections, and difficulty in controlling well trajectories, which are particularly prominent and need to be solved urgently. Based on the analysis of the limitations of traditional solutions, this paper proposes new tools and technologies with significant advantages as new solutions to the key problems faced by deep and ultra-deep oil and gas development, which provides direction for the development of downhole tools and effective technical support for the safe and efficient development of deep and ultra-deep oil and gas.

Key words: deep formation; ultra-deep formation; speeding up and efficiency improvement; wellbore trajectory control; casing damage repair; status recognition

随着油气勘探开发程度不断加深, 油气发现难度日益增大, 全球油气勘探开发逐渐由中浅层向深层和超深层发展^[1-3]。进军“深地”是国家战略, 作为我国油气资源重要接替区和重点勘探开发领域,

深层超深层油气已成为保障国家能源安全的重要战略资源。我国目前虽然已经在部分深层超深层油气钻采中取得了技术突破, 但常规井下工具与钻井技术仍然无法完全满足深层开发的需要, 与国外先进

收稿日期: 2023-08-10; 改回日期: 2024-01-18。

作者简介: 柳贡慧(1963—), 男, 山东黄县人, 1984年毕业于阜新矿业学院露天开采专业, 1992年获中国矿业大学(北京)矿山机械工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 长期从事井下过程控制、导向工具研制、井下信号采集与处理等方面的教学与研究工作。系本刊编委。E-mail: lgh_1029@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金“特深井复杂温压场测量与井筒压力剖面控制基础研究”(编号: U22B2072)资助。

技术相比还存在较大差距。与中浅层油气储层相比,深层超深层的地质工程条件更为复杂,复杂岩性地层、高温高压地层和不稳定地层对井控技术、钻井提速技术、井壁稳定技术和井下工具性能提出了更高的要求。深层超深层油气资源的开发,存在大量理论问题、技术问题、装备问题与工程问题亟待解决,其中有4个关键问题影响较为突出:1)地层压力体系复杂,井筒压力剖面控制难,井下复杂工况识别难;2)套损严重,修复难度大,耗时长;3)长水平段托压严重,钻井效率低;4)井眼轨迹控制难度大,钻井成本高。为此,笔者分别分析了当前解决上述关键问题存在的技术局限性,并提出对应的新型解决方案,以期为深层超深层油气的高效开发提供参考和借鉴。

1 井下复杂工况识别难

1.1 井下复杂工况

井下复杂工况,指钻井过程中由于地层条件变化、工程参数或工艺措施不合理导致的井下异常情况,主要包括气侵、溢流、井漏、井壁坍塌、钻头异常、涡动和卡钻等。井下事故,则是指发生严重影响钻井作业的恶性情况。绝大多数井下复杂工况或事故发生前,会存在某些征兆,直接表现为井下工程参数异常。

深层超深层油气资源开发对于我国能源安全意义重大,其主要特点是埋藏深、高温高压等,钻井过程中井下复杂频发、钻速慢、建井周期长、安全风险大。在钻井过程中监测工程参数变化,分析数据变化特征,可实现井下复杂工况的识别,判断井下事故发生的可能性,尽早预警,采取控制措施,避免恶性事故的发生,确保钻井作业安全^[4]。

1.2 常规技术方案

井下复杂工况检测的数据来源分为地面录井数据和随钻测量数据。基于地面录井数据的井下复杂工况识别有环空液面监测法、钻井液池体积监测法、进出口流量差法、立压套压法和综合录井法等,通常利用地面综合录井仪测量井深、大钩载荷、钻时、钻压、转速、入口流量、出口流量、钻井液性能等参数,通过分析处理地面检测所获参数判断井下工况。但井口测量参数与井下钻头处实际参数存在较大差异,且时间严重滞后,难以保证井下工况识别的准确性,增加了复杂事故处理的时间和难度。

随着随钻测量技术的发展,基于随钻测量数据

的井下复杂工况识别,根据随钻压力、随钻温度和邻井数据等建立智能预警模型^[5-7]。井下直接测量工程参数,可以提高测量的精度和准确性,但当前采用的方案主要是将井下单点测量所得数据上传至地面识别。由于随钻数据传输技术和方式的限制,仅能实时向地面传输少量数据。只根据到达地面的少量且滞后的数据,难以及时准确地识别井下复杂工况。同时,单点测量数据存在较大的不确定性,难以在井筒中建立起工程参数变化的连续性关系,监测误差大。

1.3 新型解决方案

柳贡慧等人于2013年研发了井下双测点多参数随钻测量工具,并根据测得的数据进行了井下工况解释^[8-16]。井下双测点多参数随钻测量工具可测量井下近钻头处环空压力、钻柱内温度、钻柱内压力、钻压、扭矩、振动等8个参数,同时可扩展测量环空流体的介电常数。

以井下双测点多参数随钻测量工具与井下智能分析模块为核心,研究形成了如图1所示的井下复杂工况原位实时智能识别系统。井下双测点可分别测量同类型或不同类型的参数,同时测点上下布置所测得空间差异性数据有助于构建更准确的场域模型,可全面反映井下工况,提高工况识别的准确性。井下智能分析模块可实时对所测参数进行分析。

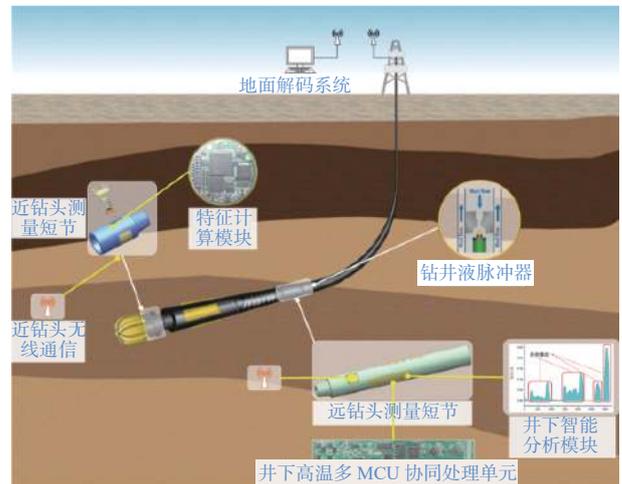


图1 井下复杂工况原位实时智能识别系统示意

Fig.1 In-situ real-time intelligent recognition system for complex underground working conditions

相对于现有常规地面分析或井下单点测量方式而言,井下双测点多参数测量工具和复杂工况井下实时智能识别解决方案的根本创新体现在由“数据上传—地面识别”跨越到“井下识别—结果上传”,既可以实现井下多个工程参数的精确实时测

量, 又可以对井下海量测量数据实时分析处理, 实时判断井下工作状况, 分析所得复杂工况类型结果通过少量代码表示, 以现有传输方式实时上传地面, 避免了数据上传速率低的限制。在深井、超深井钻井作业中, 这类解决方案将大大提前事故预警时间, 确保钻井作业安全、高效进行。

2 套管破损严重

2.1 常规套损修复工艺

井下石油套管柱是油气资源开发过程中最重要的装备之一, 它不仅能够加固井壁、保护井眼、封固复杂地层, 还能为钻井液和油气生产提供良好的循环通道。油气井在钻井和生产过程中, 受地层蠕变错动、高温、井底流体腐蚀、钻具摩擦、储层改造等影响, 套管易出现穿孔、断裂、变形、磨损、腐蚀等问题^[17]。

自 20 世纪 70 年代起, 我国各大油田就出现了不同程度的套损, 截至目前, 套损问题还在进一步恶化, 套损井的数量保持快速增加。当前常用的套管修复技术有机械整形修复技术、化学修复技术、取换套工艺技术及补贴技术等, 各自有其适用范围和局限性^[18]:

1) 机械整形修复技术。变形套管的整形修复大多采用机械整修技术, 其对应的修复工具主要包括梨形胀管器、旋压滚珠整形器、旋转震击式整形器等。对变形套管进行修复时, 需要将上述工具下

至套管变形位置, 膨胀挤压变形套管使之回到初始通畅。在此过程中需要按照从小到大的原则, 逐渐增大修复工具外径, 重复下放膨胀整形, 才能完成对变形套管的修复, 效率较低且存在外径选取不当带来套管及水泥环二次损伤的风险。

2) 化学修复技术。套管的化学堵漏修复主要采用常规无机凝胶和热固性树脂材料, 存在的主要问题是堵剂不能有效驻留在封堵层位, 形成的固体强度不高且难以与周围材料形成牢固的胶结面, 修复后的套管可靠性低^[19]。

3) 取换套工艺技术。取换套工艺技术可彻底修复套管, 但目前该技术施工最大深度一般不超过 2 000 m, 难以适应深层、超深层油气开发需求。同时, 取套和换套工艺复杂繁琐, 时间成本和经济成本较高。

4) 套管补贴技术。套管补贴技术主要包括波纹管补贴技术和液压胀管式补贴技术, 该技术的主要缺点是修复后套管内径缩小。

整体而言, 常规套损修复技术存在工艺复杂、作业时间长、一次性成功率低等问题, 亟待完善。

2.2 金属燃熔套管原位生成技术

2021 年, 柳贡慧等人^[20-22]提出了金属燃熔套管原位生成技术思路, 其工作原理如图 2 所示, 利用合金加热喷涂工具将熔化的低熔点粉状金属喷涂在铣削后的待修复套管壁上, 熔化的金属流入套管破损的部位填充后烧熔固化, 实现损伤位置局部精准修补, 无需对大段套管柱进行作业。

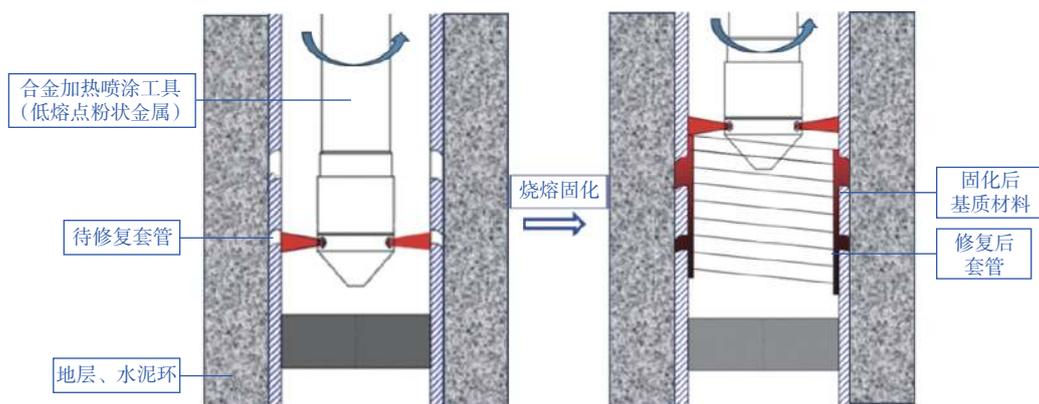


图 2 井筒原位套管修复过程示意

Fig.2 Wellbore casing repair process in situ

金属燃熔套管原位生成技术相关的理论和试验研究正在进行中, 已取得了阶段性成果。相比于传统套损修复方法, 该方法的技术优势主要体现在施工工艺简单高效, 修补过程中, 只需要下入一次装

置; 燃熔的金属呈液体状流入破损位置, 能适应不同类型的待修复套管; 修复后能获得较大的通畅, 为后续钻采作业提供更大的空间; 针对破损位置进行精准修复, 所需材料与时间成本较低。

3 长水平段托压

3.1 托压现象的危害

托压现象是指在滑动定向钻井过程中,由于钻具与井壁间摩擦力太大,导致钻压无法有效传递至钻头,于长水平段最为严重。托压现象表征为钻压不断增加,而钻头几乎没有进尺,泵压也不升高^[23]。

产生托压后,由于实际作用到钻头上的钻压很小,导致机械钻速降低,甚至无法钻进;长时间的托压和静止钻柱,不利于清除岩屑,很可能发生压差卡钻;当继续增加钻压至解除托压,钻头处钻压扭矩突然增大,引起工具面改变,钻头和动力钻具易受损,影响定向钻井效率。

3.2 常规降摩减阻技术

对于水平段托压现象,除了保持井眼清洁、提高钻井液携岩能力、提高钻井液润滑性等措施外,在钻具组合中加入水力振荡器的现场应用效果十分显著。水力振荡器的工作原理是,将流经钻井液的液体动能转化为钻柱往复运动的机械能,水力振荡器往复振动带动相邻钻具实现同步轴向往复振动,将钻柱与井壁间的静摩擦转为动摩擦,降低摩擦阻力,从而缓解托压,提高机械钻速^[24-25]。

当前水力振荡器还存在以下几个问题:1)水力振荡器入井循环后即开始工作,工具的工作状态不可控,有效使用寿命低;2)水力振荡器结构基本一致,主要包括轴向振动短节、动力短节和盘阀总成;3)盘阀总成处流道面积周期性改变,钻井液流速大,盘阀易冲蚀损坏,工具寿命短;4)工具的动力短节通常为螺杆马达或涡轮马达,工作压降较高,无法串联使用。

整体而言,水力振荡器作为主要的降摩减阻工具尚有明显的优化设计空间,通过可控化结构设计可以有效提高其工作寿命和适应性。

3.3 可控式水力振荡器

可控式水力振荡器由轴向振荡短节、控制阀短节和测量短节组成,其中振荡短节和控制阀短节的结构如图3所示。旋转阀体的往复旋转可以使轴向振荡短节的振荡控制腔体产生周期的高低压力变化,从而使工具产生轴向振荡。通过控制旋转阀口流道开闭,可决定旋转阀是否进行往复旋转运动,切换工具振荡工作和待机状态;通过调节阀口开度,可以改变旋转阀往复运动频率,切换工具高速振荡和低速振荡状态。测量短节实时采集钻柱振动

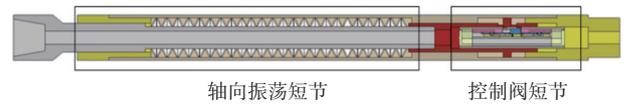


图3 可控式水力振荡器机械结构示意图

Fig.3 Mechanical structure of controllable hydraulic oscillator

数据,分析监测钻柱运动状态,控制轴向振荡短节工作与关闭。可控性主要体现在控制开启时间和工作频率2个方面。

相比于传统水力振荡器,可控式水力振荡器的优势主要表现在2方面:1)工作状态能够自主调节,当测量短节监测钻柱运动状态正常时,工具处于待机状态;当测量短节监测到钻柱运动处于托压状态时,调节工具进入振荡工作状态,振荡频率可根据井下工况需求来选择,适应性更强。2)可控式水力振荡器工作压降较小,在长水平段中可以考虑安装多个水力振荡器,通过合理调节振荡器之间的相对位置和振荡器在整个钻柱中的布局,能够发挥最大的降摩减阻作用。

4 井眼轨迹控制难

4.1 导向钻井技术发展现状

从1980年至今,滑动导向钻井技术一直是导向钻井的主力技术,滑动导向钻井主体工具为井下动力钻具。滑动导向钻井的局限性^[26]是钻柱不旋转,部分钻柱贴靠井壁,摩阻较大,易产生托压现象,从而导致钻速较低,钻井成本增高。实际钻井过程中,常需要交替使用导向马达和转盘法钻进,既增加了起下钻次数、降低了钻井效率,又必然使井眼方位不稳定,井身轨迹不平滑,井身质量差,易导致井下复杂情况。在油气资源开发不断向深层超深层发展的现状下,滑动导向钻井技术已无法满足深井、超深井和复杂结构井的导向钻进需求。

旋转导向系统是在钻柱旋转钻进时,随钻实时完成导向功能的一种导向式钻井系统,代表着当今世界钻井技术发展的最高水平,根据其导向方式可以划分为推靠式和指向式2种;根据其偏置机构的工作方式又可以划分为静态偏置和动态偏置2种。国外几大油服公司,如斯伦贝谢、哈里伯顿、贝克休斯等已形成标准化、系列化、特色化的旋转导向产品。当前商业化旋转导向产品的关键核心技术仍掌握在外国公司手中,国产导向工具结构主要还停留在仿制阶段,尚未突破国外成熟导向机构的限制。

同时, 国内的旋转导向系统研发主要集中于较为简单的静态偏置推靠式, 钻柱无法实现全旋转, 而动态偏置指向式旋转导向工具可适应各种复杂的地层环境, 在水平井、大位移井、三维多目标井及其他高难度特殊工艺井中更具竞争力。

4.2 新型动态偏置指向式旋转导向系统

柳贡慧等人^[27-30]于 2020 年提出了一种内推指向式旋转导向工具, 具有完全自主知识产权。作为一种以钻井液压差为动力的动态偏置旋转导向工

具, 内推指向式旋转导向工具导向原理先进, 具有能耗低、工作适应性好和位移延伸能力强的优点。

内推指向式旋转导向工具系统导向头如图 4 所示, 包括功能相对独立的 3 部分: 导向执行单元、伺服动力单元和斜盘控制单元。导向执行单元在伺服动力单元驱动下偏置钻头产生工具结构弯角; 伺服动力单元为导向执行单元调整楔块提供足够推力, 同时传递位移控制参数; 斜盘控制单元控制伺服动力单元的输出位移, 进而控制导向执行单元动作。

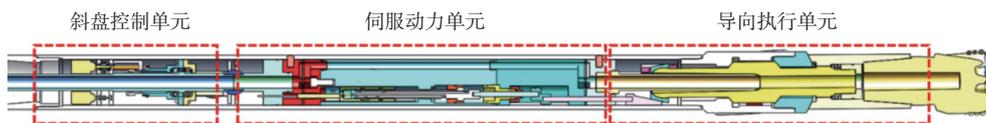


图 4 内推指向式旋转导向工具导向头结构示意图

Fig.4 Structure of the internal push point-the-bit rotary steering tool

内推指向式旋转导向工具的导向执行单元采用楔形块滑动副作为偏置机构, 通过控制调整楔块轴向位移可使调整杆相对工具轴线偏转一定角度, 带动钻头实现全方位小角度的偏转, 达到调整钻头指向的目的。通过楔块斜面将轴向驱动力转化为径向偏置力, 避免了复杂的径向偏置结构和驱动装置, 结构简单紧凑, 同时省力斜面能够有效增大工具造斜力。配合伺服动力单元, 以钻井液压差为动力源, 通过位置伺服阀传递位移参数的同时可为钻头提供较大的偏置力。经过仿真模拟计算可得工具导向力的周期变化情况如图 5 所示, 平均导向力可达 48.3 kN。

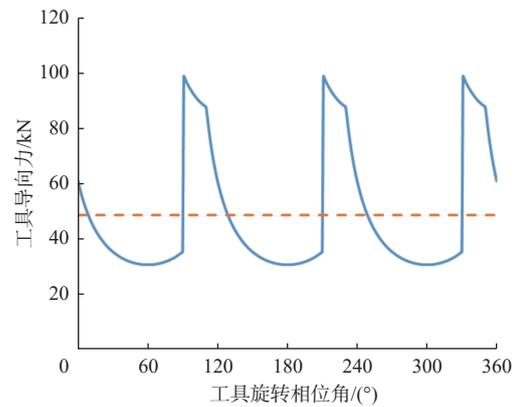


图 5 旋转状态工具导向力动态变化规律

Fig.5 Change in the guiding force of the rotating tool

斜盘控制单元结构如图 6 所示, 以斜盘机构为核心, 配合由方位调整电机、倾角调整电机、旋转拉套、方位控制套等组成斜盘倾角调整机构和斜盘面向调整机构完成工具控制。在工具结构弯角和工具面角保持不变的情况下, 导向执行单元的 3 个调整楔块应相对于工具外壳体做 120°等相位差的轴向往复正弦运动。斜盘控制单元利用斜盘的几何约束关系使在斜盘上周向滑动的滑靴在轴向上产生正弦位

移, 滑靴的轴向位移通过齿轮齿条副由行程放大齿条输出至伺服动力单元, 再由伺服动力单元传递至导向执行单元, 使得调整楔块做轴向往正弦运动。通过调整斜盘倾角可改变调整楔块正弦位移的幅值, 从而达到调整工具结构弯角的目的; 通过调整斜盘面向可改变调整楔块正弦位移幅值所在方位, 从而达到调整工具面角的目的。斜盘控制单元通过一个

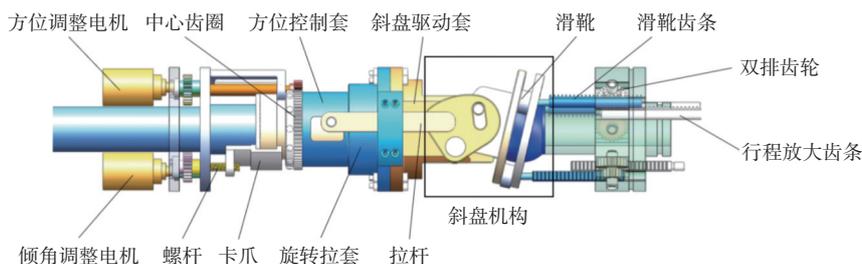


图 6 斜盘控制单元结构示意图

Fig.6 Structure of swash plate control unit

斜盘实现多组位移参数的生成和输出,实现了工具面角和结构弯角控制方法的简化,建立了简洁的工具姿态控制传递函数,可有效解决动态偏置旋转导向工具控制难的核心技术问题。

内推指向式旋转导向系统由井下内推指向式旋转导向工具系统、双向通讯系统和地面监控系统共

同组成,如图7所示。内推指向式旋转导向工具导向头负责完成钻头偏置和调整动作,单独设计的姿态测量系统负责测量导向头各项运动参数并传递至运算控制中心,运算控制中心将实钻井眼轨迹与预设井眼轨道进行对比,获取工具导向调整策略,发出控制指令调整导向头动作。

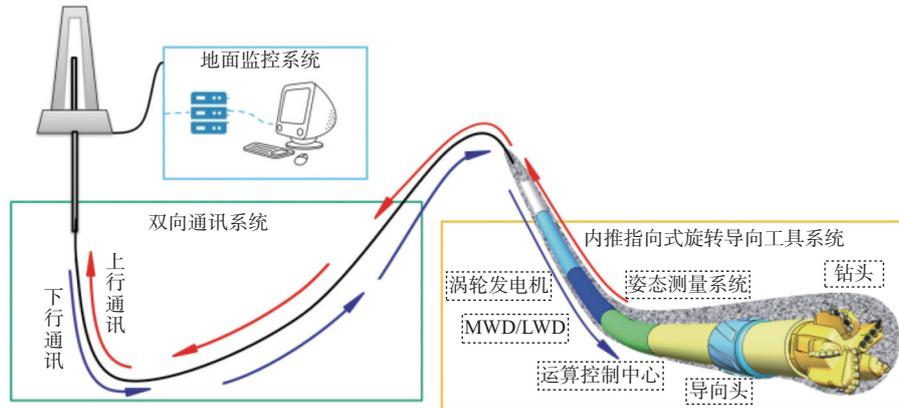


图7 内推指向式旋转导向系统组成

Fig.7 Composition of the internal push point-the-bit rotary steerable system

5 结束语

深层超深层油气安全高效开发面临诸多挑战,井下复杂工况识别难、套管破损严重、长水平段托压严重和井眼轨迹控制难等4个关键问题尤为突出,传统的技术方案难以解决。在分析传统解决方案的基础上,针对性地提出了井下复杂工况原位实时智能识别系统、金属燃熔套管原位生成技术、可控式水力振荡器和内推指向式旋转导向系统,通过新型井下工具解决传统井控和钻井技术方案存在的问题,能够为深层超深层油气的安全高效开发提供技术支持,为井下工具发展提供方向指导。

参 考 文 献

References

- [1] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649.
SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [2] 何立成, 唐波. 准噶尔盆地超深井钻井技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 1-8.
HE Licheng, TANG Bo. The up to date technologies of ultra-deep well drilling in Junggar Basin and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 1-8.
- [3] 贾利春, 李枝林, 张继川, 等. 川南海相深层页岩气水平井钻井关

键技术与实践[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 145-152.

- JIA Lichun, LI Zhilin, ZHANG Jichuan, et al. Key technology and practice of horizontal drilling for marine deep shale gas in southern Sichuan Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 145-152.
- [4] DENNEY D. Early symptom detection for downhole conditions: Principles and results[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(2): 83-89.
- [5] 吴柏志, 杨震, 郭同政, 等. 多尺度随钻方位电磁波测井系统响应特征研究[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 7-13.
WU Baizhi, YANG Zhen, GUO Tongzheng, et al. Response characteristics of logging while drilling system with multi-scale azimuthal electromagnetic waves[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 7-13.
- [6] 刘天霖, 岳喜洲, 李国玉, 等. 超深探测随钻电磁波测井地质信号特性研究[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 41-48.
LIU Tianlin, YUE Xizhou, LI Guoyu, et al. Study over the geo-signal properties of ultra-deep electromagnetic wave logging while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 41-48.
- [7] 张正玉, 袁军, 李阳兵. 高强度高温高压直推存储式测井系统在超深井的应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 117-124.
ZHANG Zhengyu, YUAN Jun, LI Yangbing. Application of rigid HTHP pipe-conveyed memory logging system in ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 117-124.
- [8] 张涛, 柳贡慧, 李军, 等. 随钻压力测量系统的研制与现场试验[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2): 20-22.
ZHANG Tao, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Pressure while drilling system development and field test[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(2): 20-22.
- [9] WANG Chao, LIU Gonghui, LI Jun, et al. New methods of eliminating downhole WOB measurement error owing to temperature vari-

- ation and well pressure differential[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 171: 1420-1432.
- [10] 黄升, 张涛, 柳贡慧, 等. 基于近钻头振动数据分析方法及应用研究 [J]. 钻采工艺, 2019, 42(6): 1-4.
HUANG Sheng, ZHANG Tao, LIU Gonghui, et al. Research on analysis method and application of near-bit vibration data[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(6): 1-4.
- [11] 姜海龙, 柳贡慧, 李军, 等. 井下工程参数测量系统的研制与应用 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(1): 5-8.
JIANG Hailong, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Development and application of downhole engineering data measurement system[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(1): 5-8.
- [12] WANG Chao, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Non-uniform temperature distribution's impact on downhole weight on bit (DWOB) measurement and the novel compensatory method[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184: 106528.
- [13] 王超. 基于近钻头工程参数测量的井下工况解释方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
WANG Chao. Study on the interpretation methods of downhole working conditions based on the near-bit measurement[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [14] JIANG Hailong, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Model based fault diagnosis for drillstring washout using iterated unscented Kalman filter[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 180: 246-256.
- [15] JIANG Hailong, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Numerical simulation of a new early gas kick detection method using UKF estimation and GLRT[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 415-425.
- [16] JIANG Hailong, LIU Gonghui, LI Jun, et al. An innovative diagnosis method for lost circulation with unscented Kalman filter[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 166: 731-738.
- [17] 姜涛, 武凌燕, 吴怀锋. 油水井套损原因及治理优化策略分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(16): 34-36.
JIANG Tao, WU Lingyan, WU Huai Feng. Analysis of casing damage causes and treatment optimization strategies of oil and water Wells[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(16): 34-36.
- [18] 邓宽海. 套管非均匀挤毁及修复工作力学研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
DENG Kuanhai. Theoretical and experimental study on the casing collapse under non-uniform load and working mechanics of casing repair[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [19] 杨振杰, 李美格, 郭建华, 等. 油水井破损套管的化学堵漏修复 [J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(4): 68-71.
YANG Zhenjie, LI Meige, GUO Jianhua, et al. Recondition injury casing with plugging agent in oil and water injection wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2001, 23(4): 68-71.
- [20] 柳贡慧, 查春青, 李军, 等. 一种井下套管金属原位修复方法: CN202310479073.2[P]. 2023-07-18.
- LIU Gonghui, ZHA Chunqing, LI Jun, et al. A method for in-situ metal repair of downhole casing: CN202310479073.2[P]. 2023-07-18.
- [21] 查春青, 柳贡慧, 汪伟, 等. 一种井下封隔器原位金属封堵方法: CN202310479068.1[P]. 2023-07-14.
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, WANG Wei, et al. A method for in-situ metal sealing of downhole packers: CN202310479068.1[P]. 2023-07-14.
- [22] 查春青, 柳贡慧, 汪伟, 等. 一种井下水泥环金属修复方法: CN202310620084.8[P]. 2023-08-01.
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, WANG Wei, et al. A metal repair method for underground cement sheath: CN202310620084.8[P]. 2023-08-01.
- [23] 李文志. 水平井托压现象原因分析及解决措施 [J]. 西部探矿工程, 2021, 33(9): 32-34.
LI Wenzhi. Cause analysis and solution of horizontal well pressure holding phenomenon[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(9): 32-34.
- [24] 孟凡华, 陈立强, 张启龙, 等. 水力振荡器优化设计及应用实践 [J]. 辽宁化工, 2022, 51(7): 943-946.
MENG Fanhua, CHEN Liqiang, ZHANG Qilong, et al. Optimization design and application practice of hydraulic oscillator[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2022, 51(7): 943-946.
- [25] 明瑞卿, 张时中, 王海涛, 等. 国内外水力振荡器的研究现状及展望 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 116-122.
MING Ruiqing, ZHANG Shizhong, WANG Haitao, et al. Research status and prospect of hydraulic oscillator worldwide[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 116-122.
- [26] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向 [J]. 石油学报, 2003, 24(3): 82-85.
ZHANG Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 82-85.
- [27] 柳贡慧, 汪伟, 李军, 等. 内推指向式旋转导向钻井工具: CN202110349477.0[P]. 2021-07-06.
LIU Gonghui, WANG Wei, LI Jun, et al. Internal push directional rotary directional drilling tool: CN202110349477.0[P]. 2021-07-06.
- [28] 柳贡慧, 陈添, 李军, 等. 导向控制装置及旋转导向钻井工具: CN202111033493.5[P]. 2021-11-02.
LIU Gonghui, CHEN Tian, LI Jun, et al. Steering control device and rotary steering drilling tool: CN202111033493.5[P]. 2021-11-02.
- [29] 陈添, 柳贡慧, 李军, 等. 内推指向式旋转导向工具及其导向力分析 [J]. 钻采工艺, 2022, 45(2): 15-20.
CHEN Tian, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Internal push point-the-bit rotary steering tool and its steering force analysis[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(2): 15-20.
- [30] CHEN Tian, LIU Gonghui, HE Xin, et al. Calculation method of the build-up rate of the internal push point-the-bit rotary steering tool[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2023, 230: 212177.