文章编号：1000－7393(2024)02－0154－10　　DOI: 10.13639/j.odpt.202404057

分支井完井双管转向筒工具

马磊　刘和兴　梅明阳　徐靖　阳俊龙　曹思辉

中海石油(中国)有限公司湛江分公司，广东湛江 524057

引用格式：马磊，刘和兴，梅明阳，徐靖，阳俊龙，曹思辉. 分支井完井双管转向筒工具［J］. 石油钻采工艺，2024，46(2)：154-163.

摘要：分支井钻完井技术具有高效利用井口槽、提高采收率等特点，为解决分支井完井双管转向筒送入拔出过程摩阻难以准确控制的问题，研制了分支井完井双管转向筒工具，实现主井眼和分支井眼生产管柱同时回插密封。通过构建三阶段有限元仿真模型，分析了双管转向筒工具在回接筒中的送入与拔出过程，研究了摩擦因数、主分支井筒分离角及转向筒偏离方位角等因素对送入阻力、拔出阻力及等效应力的影响，摩擦因数对最大等效应力影响不明显，对行进阻力影响较大；分支井与主井筒之间的分离角对最大等效应力和行进阻力响应较大；偏离方位角对最大等效应力影响不明显，但对行进阻力影响显著，作业时应维持较小的偏离方位角，建议控制在 45°以内。通过地面试验和实验井试验进行了验证，结果表明，建立的数值模型及分析方法能有效模拟双管转向筒送入拔出过程，相对采用传统简化方法计算的阻力误差由 55% 降至 13%，实验井的产量较邻井提高了 50%，验证了该工具的有效性，为分支井工具设计与作业提供了技术支持。

关键词：分支井；完井；双管转向筒；摩阻；有限元；接触分析；非线性

中图分类号：TE952　　**文献标识码：** A

Double-pipe deflector tool for multilateral well completion

MA Lei, LIU Hexing, MEI Mingyang, XU Jing, YANG Junlong, CAO Sihui

Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., *Zhanjiang* 524057, *Guangdong*, *China*

Citation: MA Lei, LIU Hexing, MEI Mingyang, XU Jing, YANG Junlong, CAO Sihui. Double-pipe deflector tool for multilateral well completion［J］. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(2): 154-163.

Abstract: Multilateral well drilling and completion technologies present such characteristics as efficient utilization of well slots and enhanced oil recovery. However, accurately controlling the friction during the insertion and extraction of the double-pipe deflector in multilateral well completion presents one challenge. To address this issue, a double-pipe deflector tool was developed for multilateral well completion, enabling simultaneous reinsertion and sealing of production strings in both the original hole and the branch hole. A three-stage finite element simulation model was established to analyze the insertion and extraction processes of the deflector tool in the reconnecting sleeve. Furthermore, the effects of the friction coefficient, the separation angle between the main and lateral wellbores, and the bias azimuth of deflector on insertion resistance, extraction resistance, and equivalent stress were analyzed. The influence of friction coefficient on maximum equivalent stress is slightly, while greater on travelling resistance. The separation angle between the main and lateral wellbores influences the maximum equivalent stress and travelling resistance greatly. The influence

基金项目：中国海洋石油集团有限公司重大科技专项“南海西部油田上产 2000 万方钻完井关键技术研究”(编号：CNOOC-KJ135 ZDXM38ZJ05ZJ)。

第一作者：马磊(1982-)，2005 年毕业于中国石油大学(北京)机械设计制造及其自动化专业，现从事海上油气井完井、测试作业及研究工作，高级工程师。通讯地址：(524057)广东省湛江市坡头区南油一区油公司大楼。E-mail: malei1@cnooc.com.cn

通讯作者：徐靖(1990-)，2013 年毕业于西南石油大学石油工程专业，现从事海上油气井完井装备的相关研究工作，工程师。通讯地址：(524057)广东省湛江市坡头区南油一区油公司大楼。E-mail: xujingcnooc@163.com

of bias azimuth on maximum equivalent stress is slightly, while greater on travelling resistance. Thus, smaller bias azimuth had better be maintained during operation, which is suggested within 45°. The performance of the tool was verified through ground test and experimental well test. The results show that the numerical model and analysis method developed effectively simulate the insertion and extraction processes of the deflector tool. Compared to traditional simplified methods, the error in resistance calculated is reduced to 13% from 55%, and the production rate of the experimental well is increased by 50% compared to neighboring wells. This finding validates the effectiveness of the tool, which provides a technical support for the design and operation of multilateral well tools.

Key words: multilateral well; completion; double-pipe deflector; friction resistance; finite element; contact analysis; nonlinearity

0 引言

海上油田受到海洋平台空间的限制，平台井口槽紧张，调整井实施困难[1]，调整井高效实施的关键是井筒和槽口的再利用[2]。分支井钻完井技术是在保留老井眼的基础上，在井筒内开窗侧钻，增加新井眼，增大油藏泄漏面积，同时可高效利用现有井口槽，大幅度降低油气田开发成本。

分支井技术主要受限于相关完井技术，重点在于实现分支井眼与主井眼分支接口位置的支撑、密封及支井重入等方面。从分支井完井方式的功能性和复杂性的角度分为六个级别[3]。一级完井到四级完井无法实现接口密封；一级和二级完井接口无支撑，且支井不能重入；三级完井接口为机械支撑，支井有限进入；四级完井接口水泥支撑，支井起油管进入。为实现完井后能够选择性重新进入井眼，五级及以上的分支井能够实现主井眼与分支井眼连接处的完整机械支撑和整体液力密封[4]，应用前景和适用范围更为广阔[5]。

五级及以上的分支井完井级别高，作业程序多[6]，国外知名油田服务公司开发了系列商用化井下分支系统，在五级分支井系统方面，以斯伦贝谢公司的 RapidX 系统、哈利伯顿公司的 FlexRite 系统和贝克休斯 HOOK 系统为典型代表。目前，在五级分支井技术领域，国产配套工具尚无成熟商业应用，与国外存在一定差距，加强对分支井钻井和完井相关工具的开发是十分必要的[7]。

大量学者围绕该项技术进行深入研究。刘晗[8]针对预先设置导向装置的插入与取出问题，研制了Ø170 mm 分支井重入工具丢手装置，开展了装置关键状态有限元分析，通过室内模拟试验证明装置满足要求；杨世洲等[9]采用有限元软件研究了六级分支井分岔装置的爆破失效与结构失稳问题，并且通过打压实验验证了模拟结果的可靠性；齐亚民等[10]研制了多分支井自膨胀回接装置，实现了双级液缸、超长锚定爪、上提或旋转丢手和可钻自膨胀套管等功能，通过现场应用结果显示，该装置能够确保在大角度分支井眼中完井管串长期稳固定位；黄辉等[11]开展了预成型分支系统膨胀整形工具设计及数值模拟研究，解释了膨胀整形过程中所需的力学分布规律，确定了所设计的液压活塞缸在膨胀整形工具上的布局；于文涛[12]设计了一个分支井井眼连接总成，包含预制的模板和连接器，在不同地层压力工况下仿真分析了该总成的应力与位移情况，并在胜利油田进行应用，验证了连接总成的可靠性；范白涛等[13]开展了双管完井管柱的研究，采用简化约束的方式对工具进行了力学分析，基于地面试验验证了管柱功能，并开展了先导性试验；马磊等[14]研制了分支井回接筒，开展了回接筒下放过程的仿真，并进行了地面实验；刘兆年等[15]开展了分支井多级完井的窗口连接器设计，采用固定约束的仿真模拟方法，通过施加形变量、力和力矩载荷，开展了连接器工具的强度分析与校核，并开展了工具地面模拟测试。

目前在五级分支井完井工具和工艺中，分支井完井双管转向筒能够实现主井眼和分支井眼生产管柱同时回插密封，形成两个生产通道，并能够配合生产滑套实现主井眼和分支井眼的选择性开采或合采，该项技术难度大，相关设计研究较少；五级以上分支为实现接口处完整的机械支撑，对工具下放位置与角度要求较高，需要相关井下工具的摩阻计算有较高的精度，但类似装备多采用简化模型的有限元方法进行设计分析，未考虑管柱之间相互影响，导致现场作业情况与设计计算结果出现较大偏差，给分支井完井现场作业带来一定影响。

针对上述问题，结合前期成果，研制分支井完井双管转向筒工具，构建工具下放作业的非线性接触数值模型，提出采用分步加载方式模拟插拔性能的方法，并通过地面实验和实验井试验对工具进行了验证。

1 方法过程

分支井完井双管转向筒工具研制过程分别从室内研究和现场试验两个方面开展。室内研究主要基于有限元法对双管转向筒工具在回接筒内运动过程进行仿真研究，现场试验主要利用研制的转向筒工具及其他工具在地面模拟装置和实验井对整个分支井系统进行试验与验证。

1.1 室内研究

在转向筒工具设计的基础上，开展理论分析和有限元分析，研究转向筒工具下放过程的阻力及影响因素。

1.1.1 双管转向筒工具结构和工作原理

结合分支井后期井筒干预的需求，自主研制一种分支井完井双管转向筒工具，如图 1 所示。

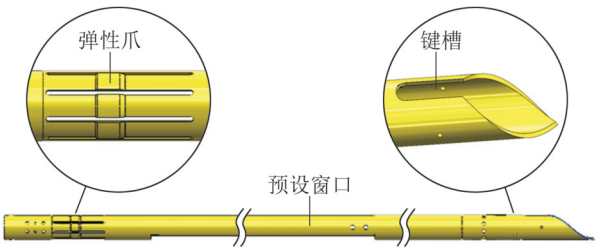


图 1 双管转向筒结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the double-pipe deflector tool

从图 1 中可以看出，双管转向筒为中空结构的管柱，上部设置 6 组弹性爪，预设窗口位于双管转向筒中部，与井筒中的回接筒以及主井眼窗口对应，下部设置弧形引导面及键槽。

双管转向筒采用导向盲接引鞋设计，在窗口下部分支井眼内实现定位，实现分支井眼内回接管柱进入分支井眼内密封筒；同时采用导向斜面设计，实现主井眼回接管柱自动导向，进入主井眼下部密封筒，双管自动导向的插入方式同步回接，实现主井眼和分支井眼生产管柱同时回插密封。通过上述双管同步自动导向插入设计，形成两个密封的生产通道，配合生产滑套，能够满足主井眼和分支井眼的选择性开采或合采。双管转向筒完井作业时，一趟钻完成主井管柱和分支井管柱同时送入，作业示意图如图 2 所示。可以看出，转向筒连带双油管管柱送入回接筒时，开始阶段弹性爪外径大于回接筒内径，弹性爪受到压缩，随着送入深度增加，弹性爪进入回接筒内壁凹槽，实现插入深度定位；同时，双管转向筒底部弧形引导面与回接筒内的导向套接触，导向套上设置有与之配合的导引键和弧形引导面，由于回接筒已经在分支井筒处固定，双管转向筒随着导向弧面旋转，并最终达到预定的角度。

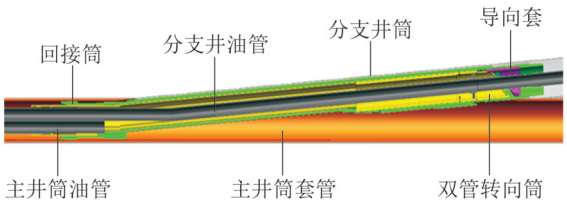


图 2 双管转向筒作业示意图

Fig. 2 Operation diagram of the double-pipe deflector tool

1.1.2 有限元模型研究

双管转向筒是一种完井井下管柱，符合井下管柱力学的基本描述，井下管柱是一种特殊结构形状的弹性体，包含几何方程、动量方程及本构方程。几何方程采用 Euler-Bernoulli 梁假设或 Timoshenko 梁假设，反映了管柱应变与变形之间的规律；动量方程反映了管柱运动与作用力关系，对于稳态问题，反映了管柱内力与外力的平衡关系；本构方程表达了管柱应力与应变的关系，与几何方程结合，就能得到管柱内力与变形之间的定量关系。

当管柱在井眼内发生运动时，管柱与井壁相互作用，产生摩阻和扭矩。在计算分析摩阻扭矩时，可以假定井壁与管柱的接触是连续的，这时可以用接触力的大小和方向表征接触关系；通常假定变形的曲线与井眼的轨迹轴线重合，就可以确定井下管柱的变形曲线[16]。

对于管柱的力学分析通常包含微分方程法、能量法和有限元法。微分方程法对管柱及约束进行一定的简化后，构建微分方程和定解条件，最后采用解析的、半解析或数值的方法进行求解，具有计算速度快的优点，但对于微分方程较为复杂的情况，特别是该类问题经常出现大挠度的问题，在应用时受到较多的限制[17]。能量法适用于管柱的小变形静力分析，在接触问题分析受到较多的影响。有限元法作为一种数值分析方法，适用于求解区域不规则、约束复杂的数学与力学问题，在管柱结构的静动态分析中得到广泛应用[18]。

双管转向筒在回接筒内送入过程是一个复杂的非线性接触问题，该过程力学问题较为复杂，导致其微分方程较为复杂，连续接触的假设不完全符合实际的情况，且存在较多的简化，微分方程法无法满足要求，因此双管转向筒的研究采用有限元法开展。

有限元法分析问题时，为获得更高的计算精度，就需要更小的单元尺寸和计算步长，导致模型的单元数量大幅度增加，同时需要更长的计算资源和计算时间。直接利用有限元法分析转向筒进入回接筒时，由于回接筒已经进入分支井井筒，回接筒发生了形变，双管转向筒的行进轨迹并非一条直线，还需仿真回接筒进入分支井筒的过程，故导致计算量巨大，且计算结果难于收敛。

考虑研究对象为双管转向筒，回接筒进入分支井筒的性能前期作者已经完成相关研究[14]，在这里使用前期成果的基础上进行适度简化，提出一种3阶段仿真的方法，第1阶段进行仿真模型准备，第2阶段模拟回接筒在分支井筒内形变，第3阶段模拟双管转向筒送入回接筒的过程，如图3所示。

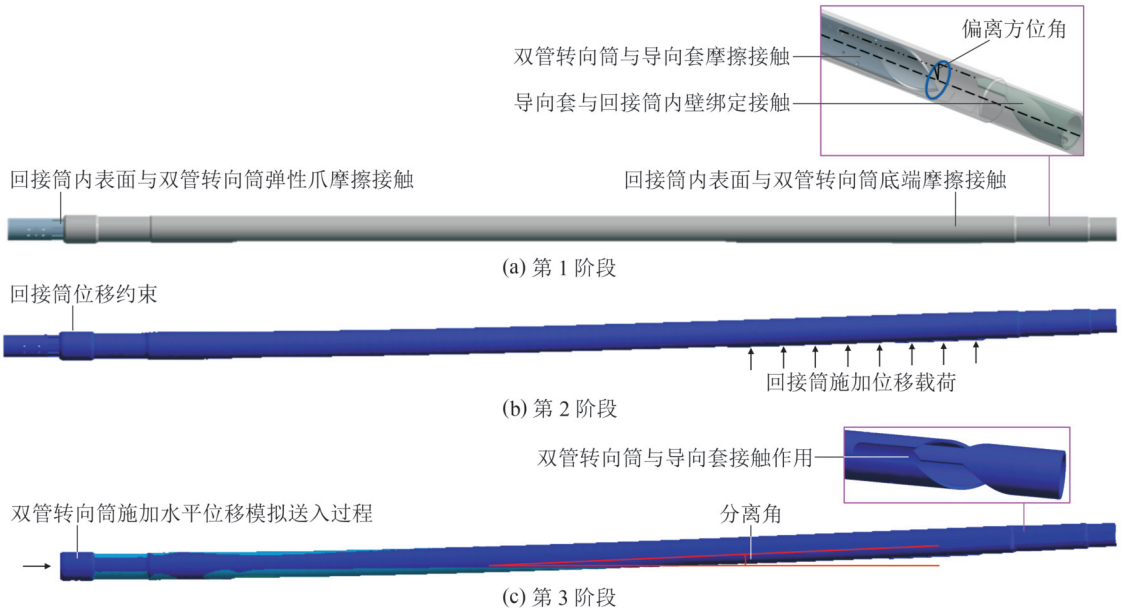


图3 3阶段仿真方法示意图

Fig. 3 Schematic of the three-stage simulation method

第1阶段为仿真模型准备，如图3(a)所示。利用通用有限元软件建立回接筒、导向套和双管转向筒接触有限元模型，主要结构尺度包括：回接筒内径170 mm，总长8020 mm；双管转向筒总长7352 mm，弹性爪外径177 mm。软件采用接触单元来转换接触面之间的载荷，并对接触相对位置进行跟踪，在这里采用柔性体与柔性体的接触；双管转向筒实际下放过程中接触状态包括无接触、点接触、连续接触和完全接触，接触行为分为绑定接触、不分离接触、无摩擦接触、粗糙接触和摩擦接触，双管转向筒的接触状态随着下放过程也在发生变化，需设置不同的接触行为。

双管转向筒下放过程中，双管转向筒弹性爪与回接筒内表面摩擦接触，导向套与回接筒内壁绑定接触，双管转向筒与导向套摩擦接触，回接筒内表面与双管转向筒底端摩擦接触。双管转向筒的分析中接触结构不发生相互穿透，为避免发生模型中相互穿透，采用增强Lagrange法的接触算法。

根据前述条件，分别在回接筒内表面、转向筒外表面以及导向套接触弧面建立接触单元，在回接筒与转向筒弹性爪接触区域、转向筒与导向套接触区域、转向筒端部与回接筒接触区域根据接触行为设置不同类型的接触对。为确保分析结构精确性，对应的接触区域的有限元网格进行细化处理。对于双管转向筒分析中，结构出现大位移和大应变，结构位移与应变之间的关系不满足线性描述，需要考虑应变与位移之间的非线性关系，故采用几何非线性求解器，利用Newton-Raphson迭代算法对模型进行求解。

第2阶段为模拟回接筒在分支井筒内形变，如图3(b)所示。在回接筒顶部区域施加固定约束，模拟主井筒对回接筒的限制作用；在回接筒底部外壁施加位移约束，位移的大小取决于分支井分支点的设计，使回接筒产生形变，其挠度曲线与分支井轨迹一致。

双管转向筒在回接筒内部由于接触作用，回接

筒整体形变传导到双管转向筒，双管转向筒在回接筒内发生了形变，同时在轴向方向上也发生移动，最终使回接筒形变达到进入分支井筒内的形变状态，此时双管转向筒外表面与回接筒内表面的接触状态发生变化，有的区域由连续接触转换为无接触，有的区域由无接触转换为连续接触，为保证计算收敛性和降低计算时间开销，在该部分接触单元划分时，分区域进行考虑。

该部分关键为回接筒位移施加的位置和大小，其最终状态与回接筒进入支井的状态一致，需要进行多次迭代调整，在这里结合作者前期对分支井回接筒的研究数据[14]，利用原求解模型计算得到回接筒底部区域的位移载荷数据。

第 3 阶段为模拟双管转向筒送入回接筒的过程，如图 3(c) 所示。在双管转向筒顶部施加水平位移载荷，模拟转向筒送入回接筒的过程。一方面，此过程中，双管转向筒弹性爪在回接筒内壁的挤压下进入回接筒内壁凹槽，同时双管转向筒底部与导向套接触作用并限位，达到指定的插入深度，为提高计算效率，该过程中双管转向筒弹性爪、双管转向筒底部需分别与回接筒内壁分区域建立接触对。另一方面，由于回接筒、双管转向筒都发生形变，轴向的尺度发生了变化，导致水平位移的大小与原在直管中就位时的位移存在差异，根据实际工况进行微调，从而保证双管转向筒弹性爪能够准确进入回接筒内壁凹槽。

采用 3 阶段仿真的方法，重点研究双管转向筒送入拔出过程，分析整个过程中其最大等效应力和行进阻力，从而进一步分析摩擦因数、主分支井筒分离角、转向筒偏离方位角等因素对双管转向筒等效应力、送入阻力和拔出阻力的影响程度。

1.2 地面试验

地面试验在转向筒工具及相关五级分支井工具已加工完成后开展，除工具的常规功能和指标测试外，也是对论文数值模型的验证。双管转向筒是分支井系统的一部分，实验井试验主要面向整个五级分支井系统进行测试与验证。

有限元数值模型能够反映双管转向筒的规律和特性，但分析过程仍然存在了部分简化，不能完全模拟双管转向筒的整体下放过程，需要开展实物工具的地面试验。故在双管转向筒加工完成后，为了进一步验证相关设计与仿真，检验装备的性能，在地面搭建了地面模拟装置进行试验，如图 4 所示。

图 4 地面试验
Fig. 4 Ground test

从图 4 中可以看出，地面模拟装置采用水泥模拟地层并构建主井筒和分支井筒，利用套管、油管、回接筒构建完成的分支井接口结构，在地面通过推拉的方式对自主研制的双管转向筒进行模拟试验。试验中，回接筒已就位至开窗完成的套管内，送入和拔出转向筒并记录弹性爪拔出时的载荷，并根据 0°偏离方位角记录数据修正模型参数，计算阻力误差为评价指标，模拟转向筒从不同的偏离方位角进行送入和拔出。

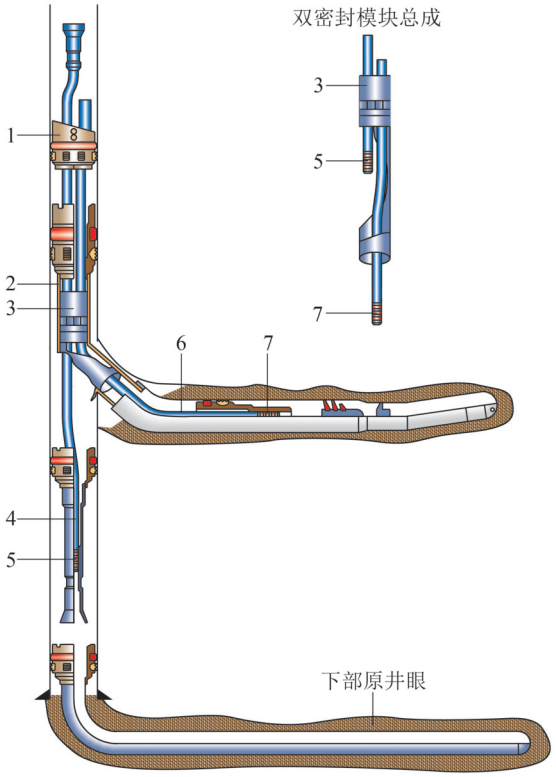
1.3 实验井试验

2023 年 12 月某井区边部井控不足区存在剩余油，需要部署调整井侧钻分支井眼，挖潜剩余油富集区域。将该井作为实验井，采用研制的双管转向筒工具实施作业，井身结构如图 5 所示，可以看出，下入的双管转向筒总成完井管柱包含回接筒、双管封隔器、双管转向筒等，试验时重点关注相关管柱的下放摩阻，用于研究双管转向筒实际摩阻。主要的施工步骤如下。

(1) 下入破裂盘+密封筒+主井眼回接封隔器，暂堵下部井眼；
(2) 下入可回收开窗斜向器，坐挂；
(3) 侧钻分支井眼；
(4) 下入回收工具，回收斜向器；
(5) 下入分支井眼完井管柱，分支井眼完井；
(6) 下入破裂盘击碎工具，下压 60 kN 击碎破裂盘；
(7) 下入分支井眼导向器；
(8) 分支井眼下入封隔器+密封筒；
(9) 回收分支井眼导向器；
(10) 下入双管转向筒总成完井管柱。

2 结果现象讨论

基于提出的 3 阶段仿真的方法，构建了有限元模型，配合分支井相关工具，开展了仿真模拟、地面



1—双管封隔器; 2—回接筒; 3—双管转向筒;
4—主井眼配长油管; 5—主井眼导向密封插头;
6—分支井眼配长油管; 7—分支井眼导向密封插头

图 5　完井井身结构

Fig. 5 Completion wellbore configuration

模拟装置试验以及实验井试验，并对结果进行分析讨论。

2.1　室内研究结果

2.1.1　有限元仿真结果

为分析 3 阶段仿真方法的有效性，建立典型工况的分析过程，考虑双管转向筒与回接筒摩擦因数 0.1，分支井筒与主井筒分离角 2°，双管转向筒键槽与导向套引导键偏离方位角 0°，双管转向筒在回接筒内进入 660 mm。

设计 45 个载荷步，0~10 载荷步分阶段施加位移载荷模拟回接筒在分支井筒的形变；11~28 载荷步分阶段加载水平位移，从 0 mm 增加至 660 mm，模拟转向筒送入回接筒的过程；实际工程实践中，为验证转向筒就位情况，根据实际需要有时也进行回接筒拔出验证，故为进一步验证回接筒拔出性能，29~45 载荷步分阶段减小水平位移，从 660 mm 减小到 0 mm，模拟转向筒拔出回接筒的过程。

计算完成后，提取各个载荷步下双管转向筒的水平阻力和最大等效应力结果，如图 6 所示。可以看出，在模拟分支井阶段，即分支井筒构建过程中，转向筒水平方向阻力较小，且基本保持不变，转向筒最大等效应力随着分离角增加；在转向筒送入回接筒的过程中，转向筒最大等效应力和行进阻力先增加后减小到最后维持相对不变的过程；在转向筒拔出回接筒的过程中，转向筒最大等效应力和行进阻力的变化，与送入过程类似，呈现一个逆过程的趋势，但峰值与送入过程存在一定差异。结合具体加载而成，分析如下。

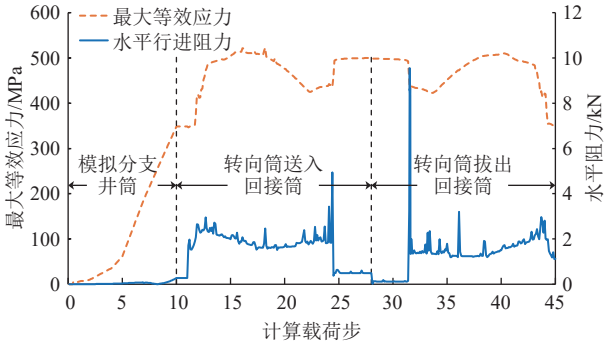


图 6　双管转向筒工具仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the double-pipe deflector tool

模拟分支井阶段，从开始到第 10 载荷，分离角等效位移载荷逐渐施加于回接筒，最终回接筒的形变挠度曲线达到 2°分离角，同时转向筒位于回接筒内部，在接触作用下发生变形。最大等效应力的增加，是由于转向筒受到回接筒的限制，发生弯曲变形，应力增加；而水平方向，转向筒相对自由运动，导致水平阻力整体较小，且变化大不。

转向筒送入回接筒的阶段分为 3 个过程。

第 1 个过程，转向筒弹性爪开始进入回接筒。从第 11 载荷步开始，转向筒的最大等效应力和水平阻力开始增大，其原因为在转向筒端部施加水平位移载荷，转向筒进入回接筒，随着弹性爪回缩，并与回接筒内壁接触发生变形，导致应力和阻力不断上升。

第 2 个过程，转向筒弹性爪完全进入回接筒，但未进入回接筒内壁凹槽。从第 13 载荷步开始，最大等效应力出现波动震荡后小幅减小，而水平行进阻力基本不变。出现波动的原因为，在行进过程中接触区域发生变化，由于弹性爪与回接筒接触单元网格划分不完全对称一致，导致计算过程中不同收敛精度。最大等效应力小幅减小，主要是因为转向筒随着进入回接筒深度不同，在回接筒接触作用下接触区域发生了变化，支撑位置不同导致等效应力的

变化。

第 3 个过程，转向筒弹性爪完全进入回接筒内壁凹槽。从第 24 载荷步开始，最大等效应力增大后保持相对不变，行进阻力在出现一个峰值后，下降到较低水平，并维持相对不变。转向筒弹性爪完全进入凹槽后，回接筒内壁凹槽内径大于弹性爪外径，导致弹性爪受到的挤压力大幅度降低，导致转向筒行进阻力降低。同时转向筒最大等效应力位置从弹性爪区域转移到转向筒外壁，从而出现最大等效应力的增大。在第 28 载荷步，回接筒送入深度 660 mm，实现插入深度定位。

转向筒拔出回接筒阶段，从第 28 载荷步开始。第 1 个过程，转向筒弹性爪在回接筒凹槽行进，从第 28 载荷步到第 31 载荷步，最大等效应力与行进阻力变化基本是送入过程该阶段变化的逆过程。但转向筒行进阻力在最后一阶段，即拔出回接筒凹槽时的峰值超过送入时峰值，这是因为弹性爪两侧倒角斜面角度不同，有利于拔出过程根据阻力的变化判断转向筒在回接筒内的相对位置。第 2 个过程，弹性爪开始拔出回接筒，从第 32 载荷步到第 45 载荷步，与转向筒送入过程最大等效应力和行进阻力的变化基本类似，呈现一个逆过程。

从最大等效应力和水平阻力数据变化趋势上看，仿真过程结果与实际转向筒送入和拔出过程应力及阻力的变化基本一致，能够捕捉到转向筒送入和拔出回接筒过程中关键位置的摩阻，说明模型能够用于分析双管转向筒送入拔出过程摩阻问题。

2.1.2 送入拔出过程影响因素分析

为实现双管转向筒送入拔出过程摩阻的控制，从摩擦因数、主分支井筒分离角度和转向筒偏离方位角度方面分析阻力的影响程度，用于指导摩阻的准确控制。

分支井与主井筒之间的分离角是分支井重要的参数，受地质、钻具等多种因素的影响，需分析不同的分离角下转向筒工具送入过程阻力和应力的变化。考虑 1°~3°的分离角，间隔 0.5°计算，共 5 个工况进行仿真计算，计算结果如图 7 所示。可以看出，分离角在增大的过程中，转向筒最大送入阻力、最大拔出阻力以及最大等效应力都在大幅度增加，影响明显，这是由于不同分离角转向筒行进轨迹差异很大，接触区域、接触单元以及接触行为都发生了较大的改变，随着分离角的变大，转向筒整体的形变也变大，造成了等效应力和阻力大幅度变大。

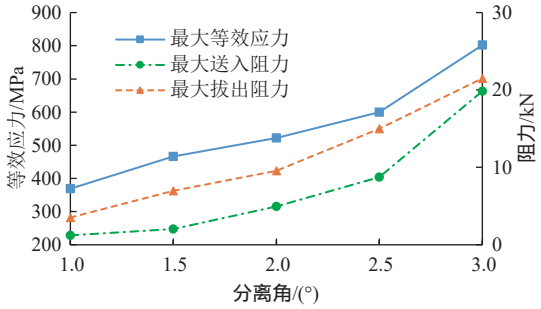


图 7 分离角对转向筒送入拔出性能的影响

Fig. 7 Influence of separation angle on the insertion and extraction performance of the deflector

在实际作业过程中，施加下放悬重时必须考虑分离角的因素，特别在深井、超深井作业时，由于整体管柱的摩阻大、伸缩量大，通过悬重变化确定时，还需要结合其他方法综合判断。

双管转向筒在回接筒内因管柱介质因素导致润滑性能的不同，故需研究不同摩擦因数对转向筒作业过程的影响，建立转向筒与回接筒摩擦因数为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 的计算工况，进行仿真实验分析，计算结果如图 8 所示。

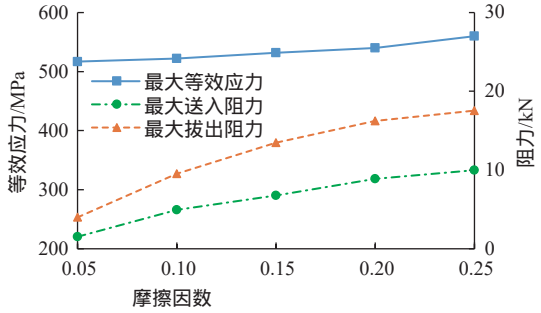


图 8 摩擦因数对转向筒送入拔出性能的影响

Fig. 8 Influence of friction coefficient on the insertion and extraction performance of the deflector

从图 8 中可以看出，随着摩擦因数的增大，转向筒的最大等效应力变化不明显，最大送入阻力和最大拔出阻力随摩擦因数增大而增大，且变化明显。这是由于转向筒送入的过程中，整体的形状变化较大，导致接触区域变化明显，反映在行进阻力上出现较大变化，而最大等效应力集中在弹性爪附近区域，而弹性爪相对回接筒内壁凹槽的变化集中在径向方向，相对轴向由摩擦引起的摩擦力影响较小。

摩擦因数对转向筒内行进过程的阻力影响较大，转向筒下放作业时遇到困难，可采用调整管柱内介质的润滑程度的方法，改变摩擦因数，从而改变行进阻力。

为实现转向筒顺利进入回接筒和套管开窗位

置，双管转向筒键槽与导向套引导键偏离方位就显得极为重要，考虑 0°~90°范围内方位角，间隔 15°计算，共 7 个工况，计算结果如图 9 所示。可以看出，随着偏离方位角的增大，最大等效应力变化不大，最大送入阻力和拔出阻力随方位角变化不断增大。特别是超过 45°后送入阻力增大明显，这是由于随着方位角增大，双管转向筒键槽与导向套的引导键接触，送入过程中转向筒除克服行进阻力，还需在回接筒进行旋转，转向筒在回接筒内旋转需克服较大阻力，从而导致阻力快速增加。实际作业来讲，转向筒送入时，应维持较小的偏离方位角，建议控制在 45°以内，遇到较大阻力时，应考虑适当拔出转向筒旋转后重新送入。

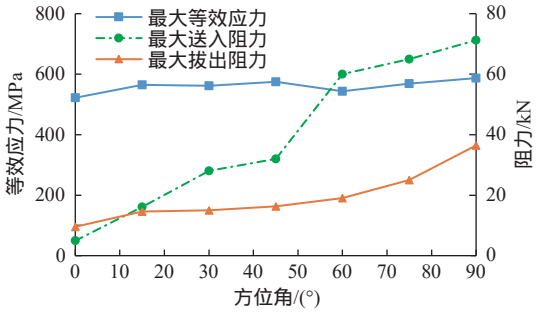


图 9 偏离方位角对转向筒送入拔出性能的影响

Fig. 9 Influence of bias azimuth on the insertion and extraction performance of the deflector

2.2 地面试验

2.2.1 地面试验结果

地面测试不同的偏离方位角情况，并将地面试验结果与有限元计算结果对比，见表 1。

表 1 地面试验结果与有限元计算结果对比

Table 1 Comparison between ground test results and finite element calculations

方位角/(°)	送入阻力			拔出阻力		
	试验值/kN	计算值/kN	误差/%	试验值/kN	计算值/kN	误差/%
15	15	16.11	7%	15	13.89	7%
45	45	39.12	13%	20	17.28	14%
90	90	75.62	16%	45	38.45	15%

从表 1 中可以看出，计算值与试验值相比最大误差 16%，为 90°偏离方位角时的送入阻力；15°偏移方位角时误差最小，误差为 7%。当出现较大偏离方位角时，双管转向筒在弯曲的回接筒内受力更加复杂，仿真模型为理想情况，导致出现相对误差，这也说明了仿真模型的正确性。

2.2.2 模型对比

基于地面试验结果对传统方法和本文方法的误差进行对比。在 45°偏离方位角时，地面试验送入阻力、拔出阻力分别为 45 kN、20 kN，本文方法计算的送入阻力、拔出阻力分别为 39.12 kN、17.28 kN，误差分别为 13%、14%，用简化方法计算的送入阻力为 20.04 kN，误差为 55%。可以看出，相对传统简化方法计算阻力误差由 55% 降低到 13%，说明提出的 3 阶段仿真方法可以解决双管转向筒送入拔出过程摩阻准确控制的问题。

分析误差降低原因认为，对于简化约束方式的非接触有限元模型，在形变和载荷较为准确的情况下，只能得到转向筒就位后最终状态的计算结果，这样就会导致计算结果并不是下放过程中的最危险情况，从而导致估算不准确，且不方便开展工具的局部结构优化。同时，由于采用简化约束，无法区分送入和拔出过程，会导致转向筒送入和拔出回接筒得到的阻力值相同。若计算还需建立弹性爪进入回接筒内壁凹槽的局部模型且得到较为精确结果，则需要较为准确的局部模型边界条件，这十分困难。

另一方面，提出 3 阶段仿真方法构建的接触有限元模型在第 2 阶段，通过模拟回接筒，实现双管转向筒在回接筒内较为准确的模拟，有利于模型计算时得到较为准确的边界条件；同时采用接触仿真模型，可以较易实现双管转向筒送入和拔出过程中的中间结果，从而捕捉到送入拔出过程的等效应力和阻力变化情况，可实现工具的强度评估，也可方便根据具体的位置对工具局部结构进行优化，能够发现转向筒送入和拔出回接筒过程中行进阻力的变化情况，从而阻力计算值具有相对较小的误差。

当然，对于采用基于接触分析的有限元模型计算时需要大量的计算资源和时间，且存在收敛困难的情况，采用简化约束方式的非接触有限元模型计算时基本可以忽略。在同等配置计算平台上，相近结构单元尺度的模型，基于接触分析的有限元模型计算时间超过 12 h，而采用简化约束方式的有限元模型小于 3 min。虽然基于接触分析的有限元模型需要更多的计算时间和资源，但通过提高计算机硬件性能、优化模型等方式可进一步降低时间，相对于整体装备研制是可以接受的。

2.3 实验井试验结果

在实验井试验过程中，发现双管转向筒下放送

入阻力为 20 kN，有限元模型计算值为 18.11 kN，误差为 9%；拔出阻力为 18 kN，模型计算值为 15.92 kN，误差为 11%，说明提出的 3 阶段仿真方法形成的接触有限元模型具有较高的精度，误差较小，能够较准确模拟转向筒的送入与拔出过程。

在实验井试验的过程中，同期对比了相同地层的邻井产量，实验井的产量提高 50%，挖潜增产效果明显。这说明，通过自主研制的双管转向筒结合相关工具，形成的五级分支井完井系统，完成了主井眼与分支井眼有效回插密封，实现了两个不同储层的联通，在节约建井成本的前提下，能够获得两口井的产量，从而实现“1+1>2”的经济效益。当然，产量提高还受到地质地层的影响，但该系统提供了增产的通道。

从整体的技术特征看，研制的五级分支井完井系统重入方式为更换再进入工具，主井眼内径为 156 mm，分支井眼内径 156 mm；与国外斯伦贝谢公司的 RapidX 系统、哈利伯顿公司的 FlexRite 系统和贝克休斯公司的 HOOK 系统的技术特征相比，在连接方式、重入方式达到基本一致的效果。整体来看，达到了国外知名油田服务公司商用化的五级分支井系统水平。

3 结论

(1) 建立了分支井完井双管转向筒非线性接触有限元模型，提出了利用回接筒外部形变模拟主井筒与分支井分离的方法，分阶段模拟送入和拔出过程，可以实现转向筒送入和拔出过程的有效仿真，相对传统简化方法的计算阻力误差由 55% 降低到 13%。自主研制的双管转向筒配合相关工具，形成的五级分支井完井系统通过实验井试验，整体性能达到了国外知名油田服务公司商用化的五级分支井系统水平。

(2) 目前实验井试验时间还较短，分支井完井双管转向筒及相关工具长期可靠性还需进一步验证。同时井下工具作业是一个较为复杂的多物理场耦合作用过程，论文研究的影响因素有限，并不能完全覆盖全部工况，主要考虑计算收敛性和计算效率的原因。

(3) 下一步将根据实验井长期应用情况，研究分支井完井双管转向筒及其相关工具作业时更多的影响因素，如井下温度场、流场以及多物理场耦合作用对工具作业时的影响，工具在井下多物理场作用下的疲劳问题，为分支井相关工具研制、生产作业等提供支持。

参考文献：

[1] 杨进，李磊，宋宇，等. 中国海洋油气钻井技术发展现状及展望［J］. 石油学报，2023，44(12)：2308-2318
YANG Jin, LI Lei, SONG Yu, et al. Current status and prospects of offshore oil and gas drilling technology development in China［J］. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2308-2318.

[2] 王晓鹏，许杰，张彬奇，等. 渤海油田井筒及井槽优化利用技术研究进展及展望［J］. 中国海上油气，2022，34(1)：134-140.
WANG Xiaopeng, XU Jie, ZHANG Binqi, et al. Study progress and outlook of wellbore and well slot optimization technique in Bohai oilfield［J］. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 134-140.

[3] 王敏生，光新军，赵阳，等. 6 级分支井系统及国内研究进展［J］. 石油机械，2015，43(3)：21-25,30.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, ZHAO Yang, et al. Six-lateral well system and progress of researches in China［J］. China Petroleum Machinery, 2015, 43(3): 21-25,30.

[4] 陈杰，武广瑷，左凯，等. 国内外分支井五级完井技术发展趋势［J］. 石油矿场机械，2019，48(4)：80-84.
CHEN Jie, WU Guangai, ZUO Kai, et al. The technology development of level 5 multilateral well［J］. Oil Field Equipment, 2019, 48(4): 80-84.

[5] 聂云飞，吴仲华，张辉，等. 五级分支井技术在河 3-支平 1 井的应用［J］. 石油钻采工艺，2012，34(2)：13-16.
NIE Yunfei, WU Zhonghua, ZHANG Hui, et al. 5 levels multi-lateral technology application in well He3-zp1［J］. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(2): 13-16.

[6] 李涛，徐卫强，苏强，等. 四川盆地高温高压含硫气井五级分支井钻完井技术［J］. 石油钻采工艺，2022，44(3)：269-275.
LI Tao, XU Weiqiang, SU Qiang, et al. Drilling and completion technology for 5-multilateral sulfur-bearing gas wells with high temperature and high pressure in Sichuan Basin［J］. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(3): 269-275.

[7] 郑有成，马勇，付志，等. 四川盆地"三高"气井 TAML5 级分支井钻完井核心技术［J］. 天然气工业，2023，43(3)：102-106.
ZHENG Youcheng, MA Yong, FU Zhi, et al. Key technologies for TAML5 multi-lateral well drilling and completion of "three-high" gas wells in the Sichuan Basin［J］. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 102-106.

[8] 刘晗. Φ170 mm 四级分支井重入工具丢手装置研制[J]. 石油矿场机械, 2023, 52(1): 81-86.
LIU Han. Development of releasing device for Φ170 mm TAML4 multilateral well reentry tool[J]. Oil Field Equipment, 2023, 52(1): 81-86.

[9] 杨世洲, 李春福, 赵强. 六级分支井分岔装置的选材[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 730-736,750.
YANG Shizhou, LI Chunfu, ZHAO Qiang. Material selection of branching device in 6-level multilateral wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 730-736,750.

[10] 齐亚民, 沙敬德, 丁金岗, 等. 多分支井自膨胀回接装置的研究与应用[J]. 石油机械, 2017, 45(6): 78-80,102.
QI Yamin, SHA Jingde, DING Jingang, et al. Research and application of expandable tieback device for multilateral well[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(6): 78-80,102.

[11] 黄辉, 王敏生, 潘豪, 等. 预成型分支系统膨胀整形工具设计及仿真分析[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(2): 33-37.
HUANG Hui, WANG Minsheng, PAN Hao, et al. The design and simulation analysis of expander of the preformed lateral junction system[J]. Oil Field Equipment, 2019, 48(2): 33-37.

[12] 于文涛. 榫合插接结构分支井井眼连接总成的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(6): 126-129.
YU Wentao. Research and application of multilateral well connection assembly of tenon & plug structure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(6): 126-129.

[13] 范白涛, 郝宙正, 武广瑷, 等. 多分支井双管完井管柱结构及先导性试验[J]. 石油矿场机械, 2022, 51(5): 22-27.
FAN Baitao, HAO Zhouzheng, WU Guangai, et al. Structure and pilot test of dual-tube completion string in multi-branch wells[J]. Oil Field Equipment, 2022, 51(5): 22-27.

[14] 马磊, 黄熠, 徐靖, 等. 分支井回接筒下放性能影响因素研究[J]. 石油机械, 2023, 51(8): 79-84.
MA Lei, HUANG Yi, XU Jing, et al. Influential factors for lowering performance of tieback sleeve in branch hole[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(8): 79-84.

[15] 刘兆年, 王彬, 柴龙顺, 等. 用于分支井多级完井的窗口连接器设计及试验[J]. 石油矿场机械, 2022, 51(2): 49-55.
LIU Zhaonian, WANG Bin, CHAI Longshun, et al. Design and test of a window connector for multilateral well technology[J]. Oil Field Equipment, 2022, 51(2): 49-55.

[16] 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 downhole tubular mechanics and control methods[J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 620-647.

[17] 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 Zifeng. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 531-556.

[18] 宋宇, 黄芳飞, 段明星, 等. 大洋钻探船月池扶正器结构准静态设计方法[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(6): 712-719.
SONG Yu, HUANG Fangfei, DUAN Mingxing, et al. Quasi static design method for the structure of the lunar pool stabilizer on an ocean drilling vessel[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(6): 712-719.

（修改稿收到日期 2024-02-29）
〔编辑 景 暖〕