

编者按:2001 年 3 月 20~22 日,在国家自然科学基金委工程与材料科学部和地球科学部组织召开的“钻井工程应用基础研究与新技术发展战略研讨会”上,31 位代表宣读了论文,从不同侧面对我国钻井工程应用基础研究发展战略问题进行了深入的研讨(会议概况及论文题目见本刊 2001 年第 3 期第 68 页)。这些论文集创新性、导向性、实用性于一体,具有较高的学术水平,限于版面,本刊特遴选 3 篇,以饕读者。

21 世纪中国石油钻井技术发展战略研究

张绍槐, 张 洁

(西安石油学院, 陕西 西安 710065)

摘 要:石油钻井技术发展的总趋势是以信息化、智能化、自动化为特点,最终实现自动化钻井。提出了 21 世纪初期(2001~2020 年)应加速研究与自动化钻井有关的主要技术:复杂结构井的产业化技术,钻井信息技术,新型绿色无污染钻井液,随钻测量和随钻地层评价技术,井下动态数据的采集、处理与应用系统,信息流闭环系统及旋转导向闭环钻井技术,现代平衡钻进技术,柔管技术等,继续解决深井、超深井钻井技术难题,进一步完善和推广油气层保护技术和小井眼产业化技术,加强钻井理论研究。

关键词:21 世纪;石油钻井工程;随钻测量;钻井信息技术;闭环钻井;钻井液

中图分类号:TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3746(2001)04-0001-05

Research on the Oil Drilling Technology Development Strategy of China for the 21st Century/ZHANG Shao-huai, ZHANG Jie (Xi'an Petroleum Institute, Xi'an Shanxi 710065, China)

Abstract: The general development trend of oil drilling technology is characterized with information, intelligence, and automation, and finally with the automatic drilling materialized in the 21st century. It is proposed that research on main techniques related with automatic drilling be speed up. The relative techniques include industrialization technology of wells with complex structures, drilling information technology, new green non-pollution drilling fluids, measurement while drilling (MWD) and formation evaluation while drilling (FEWD) technology, down hole dynamic data acquisition-processing application system, information stream closed loop system and rotary steering closed loop drilling technology, modern balance drilling technology, coiled tube technology, etc. Technical difficulties in deep and extra deep drilling shall be tackled; oil & gas formation protection and slim hole industrialization technology shall be further improved and promoted. Research on drilling theories shall be enhanced.

Key words: 21st century; oil drilling engineering; MWD; drilling information technology; closed loop drilling; drilling fluid

当前,国际石油钻井技术发展的总趋势是以信息化、智能化、自动化为特点,向自动化钻井阶段发展。国际钻井界自 20 世纪 80 年代以来,在随钻测量和随钻地层评价技术,实时钻井数据采集、处理与应用技术,复杂结构井的产业化技术,闭环旋转导向钻井技术以及自动化钻机(样机)的研制,海洋钻井技术等方面不断取得突破性进展。这些都是为了最终实现自动化钻井。21 世纪全球钻井技术将会有重大进展。我们应坚持有所为有所不为,选准内容制定规划,并按 3 个层次发展钻井技术,即成熟技术产业化,在研技术集成化和高新创新技术自主化,把自主创新放在重要位置^[1]。在 21 世纪初期(2001~2020 年),重点发展以下 10 项技术。

1 复杂结构井的产业化技术

复杂结构井包括水平井、大位移井、多分支井和原井再钻等新型油井,是用钻井手段提高产量和采收率的有效措施,并能对油气藏实行高效的立体式开发。水平井在开发复式油藏、礁岩底部油藏和垂直裂缝油藏以及控制水锥、气锥等方面效果好;水平井、多分支井等增加了井筒与油藏的接触面积,是增加产量和提高采收率的重要手段;多分支井在开发隐蔽油藏、断块油藏、边际油藏以及一井多层、单井多靶,实行立体开发等方面有优越性,大位移井在实现“海油陆采”方面有巨大潜力,它比修建海堤和人工岛更为经济有效;原井再钻已不再是几十年来用于挽救报废井的侧钻技术,它是一种能从老井和新

收稿日期:2001-05-04

作者简介:张绍槐(1931-),男(汉族),江西九江人,西安石油学院原院长,教授,博士生导师,石油工程、钻井工程专业,从事钻井工程、油气层气保护技术、石油战略研究及钻井信息技术研究等工作,陕西省西安市电子二路 18 号,(029)8383771、8383654;张洁(1963-),女(汉族),江西九江人,西安石油学院副教授,油田化学、林产化工专业,博士后,从事油田应用化学、林产化工及表面活性剂的研究工作。

井(包括直井、定向井、水平井、多分支井)中增加目标靶位扩大开发范围、利用已有管网、井场、设施的经济有效手段。国际上一致认为复杂结构井是当今石油工业上游领域的重大成就和关键技术之一,并已在许多国家和地区实现了产业化,占总进尺的10%~15%。这项技术在我国的发展是不平衡的,需再加大产业化的力度。

(1)全行业各个部门继续提高对复杂结构井优越性的认识,继续解决“投入—产出”、“成本—产量(增量)”等实际问题。

(2)进一步做好复杂结构井的钻井、固井、完井设计,发展和运用计算机模拟、可视化等高科技手段。

(3)充分掌握和不断完善几何导向与地质导向技术,主要是使用先进的MWD、LWD、SWD及旋转导向工具和闭环导向钻井技术,尤其是全旋转导向工具及闭环钻井技术,提高复杂结构井控制井身轨迹的技术水平以及钻井优化技术的水平^[2,3]。

(4)突破完井设计与完井施工的技术难关,尤其是多分支完井。掌握和应用国际多分支井技术进步(TAML)分级标准。研究解决多分支井完井的连通性、隔离性、可靠性(含重返井眼能力)这3个关键技术。研究使用无碎片系统的先进高效开窗技术。研究仅需较少的起下钻作业就能完成井下安装的多分支井完井方法。研究用于多分支井的过油管系统。研制在高温高压等复杂条件下能密封、可隔离的主—分井筒连接部件和特殊(加强)水泥(及填料)的固井完井技术。研究智能完井的软硬件和设计、施工技术。研究海上(含滩海)复杂结构井的特殊技术。复杂结构井产业化集成化技术还包括:为复杂结构井专用的软硬件;能径防偏磨的高进尺、高钻速的PDC等新型钻头、井下水力推进器、能准确预测—计算—评价和监测真实管柱(而不是简化管柱)摩擦阻力和摩擦扭矩的理论与方法;适于复杂结构井的能强化井眼净化的优质钻(完)井液;有效的模拟装置和模拟研究等。

2 井下随钻测量和随钻地层评价技术

主要包括随钻测量(MWD, EM·MWD)、随钻测井(LWD)和随钻地震(SWD),还有近钻头随钻测斜器(MNB)。

MWD与MNB可以随钻测得井斜、方位等参数,求出井眼实时偏差矢量,是实现几何导向的必要手段。三联或四联组装的LWD可以随钻测得电

阻、中子、密度及 γ 测井、声波测井的资料。SWD是一项井中地震新技术^[4],利用钻井过程中钻头产生的振动作为井下震源,使用布置在地面的检波器接收来自地层的地震波,特别是可以获得钻头前方几十米远处未钻地层的信息,从而可以随钻评价正钻与待钻地层,实时修正钻前的地质预测模型,获得几乎是真实的实钻地质模型以及油层与钻头的实时位置和相对位置等资料^[4]。LWD与SWD能够随钻识别地层是实现点移动靶和动态中靶的地质导向有力手段。尤其是当地质情况在钻前难以完全准确预测的复杂多变的地区以及复杂结构井等对井身剖面有严格要求时,能使地层尤其是油气层“咬住”钻头及下部钻具组合(BHA)钻进,从而精确优控井身剖面,达到“必然中靶”和在油气层段长距离穿越而不脱靶的效果。它是目前极为先进的地质导向手段。随钻测量技术不仅是优控井身轨迹的先进技术,也是保证优质平滑井眼和实现高效低成本优化钻井的有力措施,是实现自动化钻井的必要技术。

3 井下动态数据的实时采集、处理与应用系统,即井下随钻动态故障诊断与钻井过程控制技术^[1,2,6]

现代钻井方法的钻柱长度与直径比值为 $10^4 \sim 10^5$,即钻柱为高柔性结构并在钻进时有轴向的、扭转的和横向的振动。一定程度的振动可能发生钻头短暂离开井底使钻头空转、钻头过早磨损、钻速降低,振动严重时可能发生扭振扭转振荡,钻头和钻柱反转(涡动)钻具脱扣、钻头反跳发生意外事故、钻柱粘—滑现象、随钻测量工具和其它BHA钻具失效。

长期以来是在地面进行实时振动监测,但是它不能提供建立钻柱振动特性和钻井动态特性的精确模型。特别是通过弹性钻柱传递信号的传播质量很差,以致有害的钻头及BHA振动不能被精确检测出来。而且在打定向斜井、水平井时,由于钻柱与井壁的接触,大大减弱了在地面检测钻头处和钻头附近产生的轴向、扭转动态信号。不利于对井下的正确判断和决策。钻井动态数据在井下采集和诊断再把诊断结果传输到地面是有效控制振动、实现钻井自动控制和优化钻井决策的关键。在传感检测技术和微电子学方面的近期进展已经开发出包括一整套智能动态传感检测元件和高速数据监测与处理应用的集成系统。该系统在钻头上方装有井下传感检测组装工具,它能测8种参数12个数据,即:

(1)4个全桥式应变片组以测量井底钻压、扭矩和2个正交方向的弯矩。

(2)测量井眼压力和环空压力的压力传感器。

(3)三轴加速计以测量轴向加速度和 2 个正交方向的横向加速度。

(4)用 X、Y 两个正交的磁力仪监测井下旋转速度。

(5)用电热偶计检测井下温度。

井下传感器组装机用于采集数据。加上配套的数据信号处理仪、数据储存器、实时显示器等构成井下动态数据采集、处理与应用系统(DDS)。

在钻台上和值班室有实时显示器,显示从井下传输来的诊断信息,实现有效控制。

该系统能在 138 MPa 和 150 ℃ 条件下工作,1998 年投入工业应用,试了 10 个钻头,效果非常好,实现了新水平的钻井过程控制并将成为自动化钻井的核心技术之一^[6]。我国在井下动态数据的采集和应用方面也做过一些工作,建议根据我国油田实际加速研制国产的应用系统。

4 钻井信息技术

信息技术已经并将继续对钻井产生巨大影响。信息化、智能化、集成化是信息科学最本质的内涵。我们刚刚完成的国家自然科学基金项目——“油气钻井智能信息与模拟技术的理论与方法研究”及 863 项目——“钻井工程智能信息综合集成系统”等已有一定基础。已经和将能建立一套钻井采集分析、处理、控制与智能化决策系统,并配有先进的数据库、模型库等^[1,2,5]。正在研究和应用 MWD、LWD、SWD 和井下动态数据的采集、处理与应用系统等钻井实时信息系统。正在和继续研究钻井模拟器。钻井信息技术的新课题是研究在向自动化钻井阶段前进的道路上,闭环钻井要依靠闭环信息流来实现。图 1 表示闭环钻井时信息采集(测量)、处理(诊断)、控制(执行)、反馈、决策及双向通讯的信息流程,即井下与地面相结合的模块式钻井随钻信息集成应用系统。该系统的信息主要包括地面采集的信息、井下随钻采集的信息(MDW、LWD、SWD 等)和井下实时动态数据测量的信息(DDS)。这 3 部分信息,不管是在井下采集的还是在地面采集的,都只能在地面分别进行处理、解释,并由专家在地面进行综合解释再加以集成和决策,最后供控制(执行)之用。这种系统虽然不断加大井下信息和随钻信息的采集量以及不断提高信息在井下反馈的力度,但到目前为止,地面与井下 2 方面的主导方面仍然在地面,尤其是决策与控制仍然主要在地面进行。可以

说图 1 所表示的已是当代可以应用的最先进的钻井信息集成系统了。

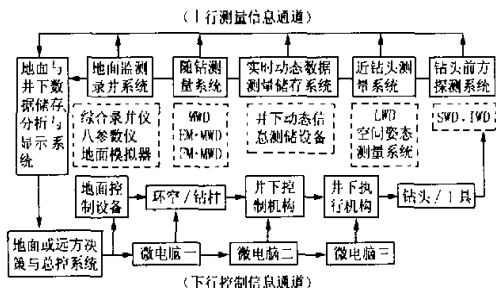


图 1 闭环钻井测量—控制—执行—通讯—信息流程图

我们应该看到钻井是一项地下工程,是在井下作业并建造油井,钻头及井下钻井工具以及钻柱系统(尤其是 BHA 部分)均在井下。为此,最好能加快发展井下控制技术并将信息流的主要部分移到井下并形成井下闭环信息流的应用系统,而地面信息流做为监控系统,实现“井下为主导、地面相配合”的新格局。随着信息技术、微电子技术、通讯技术以及可借鉴的航天技术、水下机器人等技术的迅速发展,可以预料这种新格局是迟早可以实现的。图 2 是自动导向的随钻闭环信息集成系统的信息流程原理图。

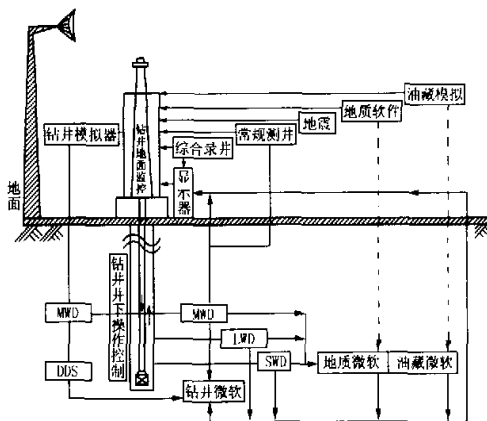


图 2 随钻闭环信息井下集成系统原理图

该系统保留(当然也要继续发展)地面采集信息和在地面把钻井、地质、油藏等多学科的信息综合集成和实行地面监控的功能,但是极为重要的是逐步把许多原来在地面进行的工作移到井下,逐步使决策与控制主要在井下进行,变井下为主导方面。这项技术的关键和要点是研制井下钻井微软、井下地质微软和井下油藏微软,它们都是智能化的,而且 3 者将能在井下直接集成并协同工作。井下钻井微软至少应具有预置井身剖面的设计以及在井下能控制所设计井身轨迹的功能。井下地质微软至少应具有

说明拟钻井段的地层岩性和地质特征等功能。井下油藏微软至少应具有对拟穿越油藏特征进行精细描述以及标定油气层(含其夹层)层位特征的功能。在钻井过程中控制井身轨迹时,随钻得到的信息(MWD、LWD、SWD、DDS等)一方面实时地直接送入井下钻井微软并在井下处理解释反馈后发出指令给钻头和导向工具实行几何导向和优化钻井;另一方面也实时地把LWD、SWD等随钻信息直接送入地质微软和油藏微软中,经直接在井下处理、解释(含反馈)后,发出信息给钻井微软进行地质导向。它是几何导向与地质导向相结合并在井下直接自动导向的,将能使井身在复杂油藏(隐蔽油藏、断块油藏、岩性油藏等)中穿越,即使油藏中油气水层相间或有夹层或含油状况多变,井身也可以辨识出很薄的纯油部分并紧紧咬住钻头(BHA),使所钻井身在油层中自动寻优控靶。该系统在井下直接进行信息采集—处理—反馈—再处理—决策—控制的同时,还可以在地面显示信息和进行监控,并通过卫星系统等通讯手段和后方(指挥部、公司总部等)进行中(远)程双向通讯,以接受指挥信息和实时报告作业施工情况。

5 绿色钻井液、完井液体系与精细化学品的研制与应用

按国际健康—安全—环保标准和发展趋势,研制不污染环境、不损害健康、不伤害油气层,并能抗温、抗盐、防塌,具有良好流变性和触变性能,满足钻复杂结构井和深井、超深井钻井、完井作业要求的新型无毒、无污染的绿色、优质、高效钻井液、完井液体系及其精细化学处理品已日感迫切。

油田化学品生产是大量耗用化工原料的生产部门之一。目前我国有10万口在产油气水井,年钻井进尺2000多万m,年修井增产作业约1万井次,每年钻采作业对油田化学品的总需求量达100万t以上。目前现场使用的合成基聚合物钻井液、完井液返排后,均会在不同程度上造成土壤的伤害,使土质板结和盐碱化等,难以满足日益严格的环保要求,必须寻求新型原材料和有效的化学改性方法,生产环保型钻井液、完井液化学添加剂。

我们最近利用绿色植物三大素(纤维素、半纤维素、木质素)经过适宜的化学改性反应,使植物三大素衍生物之间发生适度的化学结合,在适宜范围内提高其分子量,所得产物加入到不分散聚合物钻井液中,可得到比纯聚合物钻井液的流变性能和失

水造壁性能更好的改性植物三大素强化聚合物钻井液,从而进一步拓宽植物三大素化合物作为钻井液、完井液助剂的应用范围。我们还利用其他天然植物材料研制绿色、优质、高效钻井液、完井液体系与精细油田化学品,这是一个新的方向,已引起有关方面重视和用户欢迎。

6 现代平衡钻井完井技术

同直井相比,钻水平井时因为裸眼井段在油气层部位长度很大,井内流体与油气层接触的时间很长,油层污染问题更加突出,所以随着水平钻井技术的日益发展及水平井特点的需要,为解决保护油气层的要求,近年兴起了现代平衡钻井完井技术。它不仅有利于保护油层还有利于发现油气层,特别是低压、低渗油气层。

它包括平衡与欠平衡及近平衡钻井完井以及不压井起下钻技术。现代平衡钻井技术采用强化的防喷器组和井口两级分流系统,能在地面进行动态压力控制,配备有由井下传感器或井底压力计等组成的随钻监测井底压力测量和信息传输系统。在负压值的计算上要以井底点为计算点,要考虑循环时动态条件下的负压值,要用相态稳定模型进行动态计算。必要时用注入氮气的方法在井底形成负压。

7 深井技术

我国在深井钻井方面已有较成熟的配套技术,但在超深井尤其是深探井、深初探井和深层含硫气井,在钻井速度、周期、质量、效益诸方面距世界先进水平还有较大差距。为了及早赶上世界先进水平,笔者谈以下几方面意见。

(1)在钻井设计上,进一步解决精细预测技术,分类进行科学设计,并为实现科学设计做好软硬件准备,钻探井、超深井更需要加强钻井信息技术、智能技术的应用。

(2)在技术上要更加先进并应用高科技。深井、超深井的钻柱长度大,井下动态反应更加突出,需加强管柱力学应用研究,提高对钻井过程的控制,更需使用本文第一部分讲到的井下动态数据采集—控制系统(DDS)。解决深井、超深井钻井的井下轴向、横向、扭转振动及由此诱发的钻头跳钻、钻头空转、BHA涡动(反转、脱扣)、粘—滑—阻卡卡钻等复杂问题,为实现优化钻井措施扫除障碍。

(3)深井、超深井防斜打直问题也是很突出的问题。德国的KTB工程应用VDS垂直钻井系统就是

为防斜打直而研制的。打复杂结构井控制井轨技术在深直井防斜中也会得到有效的应用,同时还可尽量消除螺旋井眼、椭圆井眼等,力求井身平滑规则。

(4)进一步解决高温高压,尤其是深层气井和含 H_2S 、 CO_2 等酸性气井带来的技术难题。抗高温高压钻(完)井液技术、井壁稳定技术、抗高温高压(尤其含酸气井)的井口装置及井下工具、仪器的耐压和密封件等技术。尽早采用自动化钻井技术来打深井、超深井。严密组织管理,采用多学科团队等先进经验。

8 发展新的完井技术和方法,继续油气层保护的深层次理论研究和治理新技术的开发

继续深化油气层损害机理和测试评价方法的研究。完井技术要研究新的现代完井方法、工具和技术,改变目前完井方法比较少和单一化的状况。智能完井、选择性完井、遥控完井、复杂结构井的完井等现代完井技术是发展方向。

9 柔管技术和小井眼产业化

柔性(挠性)管(连续管)钻井、完井、修井配套技术的研究、应用与产业化。它更容易实现自动化钻井、完井、修井作业。小井眼钻井、完井、修井配套技术及产业化,这是被实践证明能大幅度降低钻井成本的产业化技术。而用柔管来实现小井眼产业化也是一条值得尝试的路子。

10 钻井主要理论的研究

(1)钻井预测理论。

①地层压力与温度预测理论的深化研究。

②分形几何和地质统计学方法预测探井储层参数的理论与方法。

③高温、高压、含硫深气井测试井筒压力、温度等参数预测模型的理论研究。

④复杂井井身斜度与方位漂移及井身轨迹的预测理论研究。

⑤钻柱摩阻、扭矩预测与准确的计算方法的研究。

(2)钻井力学的理论与应用研究。

①管柱力学理论应减少和消灭传统管柱力学中管件与管柱的若干假设,进行准确计算有内加厚、有接头的真实管件与管柱的力学理论与计算方法(含计算机软件)的研究。管柱力学理论计算宜与井下

实测技术相结合。

②继续深化对岩石、钻头与钻柱相互作用的力学理论研究与应用。

③继续深化井壁稳定性的研究。随着复杂结构井的日益发展,有许多新的问题要研究。例如,钻多分支井在钻完每个分支的进尺到该分支并固井完井,有一个裸眼时期,该时期的裸眼稳定性决定了作业的安全与风险,因此,需要根据钻多分支井油田的地质-地层条件,从力学和化学的耦合上研究这种裸眼稳定期和稳定性。

④地应力的理论研究与应用。

⑤钻井流体力学的深化与扩展理论研究。

(3)钻井化学的理论研究与应用,钻井环保理论与应用技术的研究。

(4)钻井遥感、遥测、遥控等“三遥”应用理论和钻井制导理论与应用研究。井下测量控制理论与应用技术的研究。钻井电子学理论与应用技术的研究。

(5)钻井信息、信息流及信息与网络软硬件应用理论与技术的研究。钻井智能模型的研究。

(6)钻井软件与地质油藏软件的结合。井下微电脑及井下应用软件的研究等。

11 结论

21世纪是科学技术特别是工程科学技术进一步高速发展的世纪。现代石油钻井技术的总体发展趋势是从科学化钻井的成熟阶段向实现自动化钻井阶段迈进。应该在实现自动化钻井阶段的前进道路上有所创新,在发展钻井信息技术、随钻多项测量技术、开发钻井智能系统以及推进复杂结构井产业化等方面加大研究和应用力度。

参考文献:

- [1] 张绍槐,张洁,等.关于21世纪中国钻井技术发展对策的研究[J].石油勘探技术,2000,28(1):4-7.
- [2] 张绍槐.面向21世纪钻井技术发展趋势和建议[A].石油工程学会1999年度钻井技术研讨会论文集[C].北京:石油工业出版社,2000.12-17.
- [3] 张绍槐,等.用旋转导向系统钻大位移井[J].石油学报,2000,21(1):76-80.
- [4] 张绍槐,等.随钻地震技术的理论及工程应用[J].石油学报,1999,20(2):67-72.
- [5] 张绍槐,等.石油钻井信息技术的智能化研究[J].石油学报,1996,17(4):114-119.
- [6] G. Heisig, etc. Downhole dynamics data increases drilling-process control[J]. SPE49206, JPT, 1999,51(2):38-39.