

文章编号:1673-8217(2009)01-0093-05

自动化智能化钻井技术进展

唐志军,韩来聚,刘新华

(中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院,山东东营 257017)

摘要:在介绍旋转导向钻井技术和地质导向钻井技术等近几年来钻井新技术发展的基础上,阐述了下一步钻井技术的发展方向,构建了自动化智能化钻井新技术的发展框架;通过开展随钻地震技术、近钻头测量技术等钻井新技术的研究攻关,实现钻井过程的随钻预测及自动控制;通过开展智能钻杆技术实现井下数据与地面数据及控制指令的高速率传输,最终形成闭环钻井系统,实现自动化智能化钻井。

关键词:导向钻井;随钻地震;智能钻杆;钻井技术

中图分类号:TE21

文献标识码:A

20世纪90年代以来,随着与石油勘探开发钻井相关技术的飞速发展,自动化智能化钻井新技术如自动垂直钻井技术、旋转导向钻井技术、地质导向钻井技术、随钻测井及地层评价技术等相继出现,并在现场应用中日益成熟。已成熟的导向钻井技术包括几何导向和地质导向,几何导向是按照预先设计的井眼轨道钻井,任务是对钻井设计的井眼轨道负责,使实钻轨迹尽量靠近设计轨道,以保证井眼准确钻入设计靶区(由于地质不确定性带来的误差,原设计靶区可能并非储层)。而地质导向是通过随钻测量及解释电阻率、自然伽马、岩性密度、声波等地层参数来评价地层,以井下实际地质特征来确定和控制井眼轨迹,任务是对准确钻入油气目的层负责。随着多分支井、大位移井、复杂结构井等特殊工艺技术的不断发展完善,现在油(气)井的概念已不单单是地下和地面单一油气的通道,而是发展成为连接各不同油藏或不同流动单元、最大限度增大井眼和油藏接触程度、增大油藏直接连通能力的重要途径。大位移水平井、长水平段水平井以及三维多目标井等特殊工艺井成为油气田开发后期提高油气采收率的重要手段。这就为钻井提出了更高的要求,自动化智能化钻井技术成为钻井技术发展的必然趋势。

1 自动化智能化钻井技术的构建

自动化智能化钻井是现代钻井的最高水平,是全世界石油钻井界一直追求与奋斗的目标。它集成地质导向钻井、旋转导向钻井、随钻地震、随钻测井、智能钻杆传输等技术于一体,形成闭环钻井系统。井下闭环钻井技术是实现自动化钻井的关键,在实

现井下闭环钻井技术的基础上,解决地面钻机的自动化,即钻井地面作业的自动化操作;解决钻井液自动化处理系统和自动化固井;研制钻井专家系统,实现对钻井状况的自动处理分析,并及时正确地发出各项指令和操作;最终实现自动化智能化钻井

自动化智能化钻井关键技术——闭环钻井系统主要由地面监控系统、双向通讯系统、井下工具系统、井下测量系统及短程通讯系统等组成,井下闭环钻井系统具有以下特点:

(1)井下测量系统通过随钻测量钻井工程参数,如钻头钻压、扭矩、钻柱内外的压力变化等可以实现对井下工具工作状态的实时监测,极大地提高了井下安全性能;通过对井眼轨迹等工程参数的随钻测量,与井下工具控制系统配合实现井下的闭环控制,井身轨迹控制精度高,钻出的井眼平滑、没有螺旋井眼的出现,同时对钻进特殊井段的适应性强,可减少起下钻次数,实现优质、高效钻进,提高钻井效率。

(2)井下随钻测井系统和随钻地震系统通过随钻测量所钻地层的地质参数以及随钻预测钻头前方的地层特性,可实时分辨油、气、水层,从而及时调整井眼轨迹,保证井眼在油气层中有效穿行,提高油气采收率。

(3)地面监控分析系统通过随钻测量的工程参数及地质参数可以实时判断井下工具的工作状态及钻遇地层的地质特性,实时发出控制指令,确保井眼

收稿日期:2008-07-08

作者简介:唐志军,高级工程师,1961年生,1985年毕业于胜利油田职工大学钻井专业,一直从事钻井工艺技术研究工作,现任钻井工艺研究院副院长。

轨迹以最佳路线在油层中钻进。

(4)智能钻杆可实现地面与井下测量的高效率数据传输,可以使地面监控系统对井下随钻测量信息做出更正确的分析及预测,提高预测的准确性。

2 已成熟的自动化智能化钻井技术

2.1 旋转导向钻井技术

旋转导向钻井技术是20世纪末国际钻井界发展起来的钻井新技术。旋转导向钻井技术作为几何导向钻井的最高阶段,以设计井眼轨道为最终控制目标,旋转导向钻井井下工具的测控系统可以实现井眼轨迹的随钻测量及控制,相当于给钻头装上了“方向盘”,实现了井眼轨迹的自动控制。由于旋转导向钻井系统为全旋转工作模式,因此具有井眼轨迹控制精度高、位移延伸能力强、井下安全性高等优点。旋转导向钻井技术改变滑动导向钻井方式为旋转导向钻井方式,大大提高了井身质量,减少了井下复杂事故隐患,使钻井安全性大大提高,同时由于旋转导向钻井技术可以完成复杂的三维多目标井、大位移井等高难度特殊工艺井,大大提高了钻井能力,使复杂油气藏和难动用储量开发能力大大提高,使在原来技术水平下无法开采的资源得以开发。

20世纪90年代中期,在跟踪调研国外研究的基础上,国内有少数研究机构开始进行这一方面的研究工作,但与国外水平相比存在相当大的差距,没有形成应用于现场的能力。进入21世纪,国内在国家863项目的支持下,由中国石化集团公司胜利石油管理局钻井工艺研究院和西安石油大学分别牵头对旋转导向钻井技术进行了系统的研究,在关键技术方面已取得了突破性进展,开发出了现场测试工程样机,并成功进行了现场测试试验。

2.2 旋转导向钻井系统

旋转导向钻井系统的核心是井下旋转导向钻井工具系统。按照国际惯例,目前的旋转导向井下工具系统,根据导向方式不同可划分为两种:推靠式(Push the Bit)^[1]和指向式(Point the Bit)^[2](见图1)。推靠式是在钻头附近直接给钻头提供侧向力,指向式是通过近钻头处钻柱的弯曲使钻头指向井眼轨迹控制方向。

旋转导向钻井系统的工作机理都是靠偏置机构(Bias Units)分别偏置钻头或钻柱,产生导向力。偏置机构的工作方式有两种:静态偏置式(Static Bias)和动态偏置式(Dynamic Bias)即调制式(Modulated),如图2所示。静态偏置式是指偏置导向机构

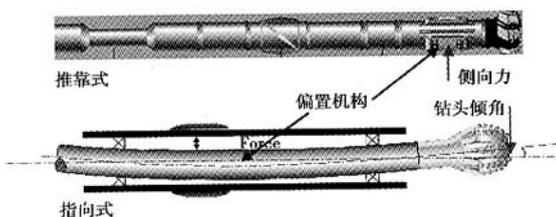


图1 旋转导向钻井工具系统导向方式

在钻进过程中不与钻柱一起旋转,从而在某一固定的方向上提供侧向力;调制式是指偏置导向机构在钻进过程中与钻柱一起旋转,依靠控制系统使其在某一位置定向支出提供导向力。

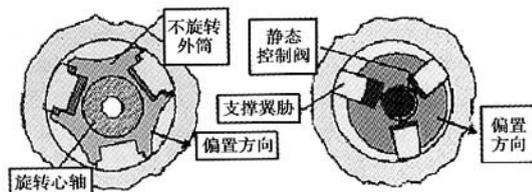


图2 两种偏置工作方式对比

综合考虑导向方式和偏置方式,可将目前世界上的旋转导向井下工具系统分为三种:静态偏置推靠式、动态偏置推靠式(调制式)和静态偏置指向式,其代表性系统分别是:Baker Hughes Inteq公司的AutoTrak RCLS、Schlumberger Anadril公司的PowerDrive SRD和Halliburton Sperry-sun公司的Geo-Pilot系统。三种旋转导向工具系统的对比见表1。

在目前比较成熟的三种旋转导向系统中,从工作原理和适应井下工作环境方面来讲,三种工作方式的旋转导向钻井系统各有其特点。Geo-Pilot系统采用控制钻柱弯曲特征来实现钻头轴线的有效导控,其优点是造斜率由工具本身确定不受钻进地层岩性的影响,在软地层及非均质地层中效果明显,缺点是钻柱承受高强度的交变应力,钻柱容易发生疲劳破坏。另外,高精度加工是保证这种系统导向效果的关键。Autotrak RCLS系统采用了静态推靠式工作原理,主要靠钻具的偏心控制来改变钻头上的侧向力。这种系统的优点是可以利用成熟的技术来实现偏心距的控制,但是井下复杂条件使得这种系统存在一些不足:非旋转外套、小型化能力差、结构复杂等都影响这种系统的发展。相对而言,调制式旋转导向工具系统在结构设计方面更为简单,小型化趋势好,全旋转工作方式使钻柱对井壁没有静止点,从而可以保证这种系统更能适合各种复

表 1 三种不同工作方式的旋转导向工具系统性能对比

| 工作方式 | 代表系统 | 旋转导向程度 | 造斜能力/ (°/30m) | 钻井 安全性 | 螺旋 井眼 | 适应井眼 尺寸/mm |
|-------------|-------------------|---------------|------------------|-----------|----------|---------------|
| 静态偏置 推靠式 | AutoTrak RCLS | 工具系统 外筒不旋转 | 6.5 | 中 | 存在 | φ216~311 |
| 动态偏置 推靠式 | PowerDrive SRD | 全旋转 | 8.5 | 高 | 存在 | φ152~311 |
| 静态偏置 指向式 | Geo - Pilot | 工具系统 外筒不旋转 | 5.5 | 中 | 消除 | φ216~311 |

杂的环境,钻井极限井深更深,速度更快,在大位移井、三维多目标井及其它高难度特殊工艺井中更具竞争力,但工作寿命有待进一步提高。

2.3 地质导向钻井技术

地质导向钻井技术是在随钻测井技术日益成熟的基础上发展起来的,以所开发的油气层为最终控制目标,可以根据井下实时地质参数及时调整和修正原钻井设计,使钻头安全有效地沿着油气层目标钻进。该系统集井眼轨迹测量控制技术和随钻测井技术为一体,相当于在钻头上开了一个“窗口”,给钻头装上了“眼睛”,现场地质师和钻井工程师根据仪器反映的所钻地层岩性及其孔隙流体的客观情况,能够及时“看到”所钻井眼的井身轨迹、地层岩性及其孔隙流体物性,并以此来修改设计和控制井眼轨迹的走向。应用地质导向钻井技术可以确保水平井眼准确进入并保持目标层内(即使储层很薄),保证井眼在产层内与油/水或油/气界面之间保持一定距离,并可连通数个断裂储层。而应用常规导向钻井技术时,MWD测量仪器仅测量井眼几何参数,而不能提供储层的地质参数,作业人员无法实现对油气层的准确判断和决策。地质导向钻井技术在老油田后期开发、提高采收率以及开采薄油层、形状特殊的难采油藏等方面具有明显的效果和显著的经济效益。地质导向钻井技术是以实时随钻测量多种井底信息为前提。井底信息包括两类:一类是地质参数,包括电阻率、自然伽马、岩性密度、声波、地层倾角等;另一类是工程参数,包括井斜、方位、工具面角、井底钻压、井底扭矩和井底压力等。因此,地质导向钻井就是在钻井过程中通过测量多种地质和工程参数来对所钻地层的地质参数进行实时评价,根据评价的结果来精确地控制井下钻具命中最佳地质目标。

目前国内多采用随钻自然伽马和电阻率测井资料,根据实际情况选择合适的测量方式。结合邻井或试验井的测录井资料,建立无孔隙度测井资料条

件下的孔隙度解释模型,建立随钻伽马、电阻率实时解释平台,实现地层对比和部分实钻地质参数的定量解释,从而实现地质导向。地质导向钻井技术主要包括以下几方面的应用:利用实时、记录测井曲线对地层进行综合评价;分辨地层、确定地层岩性、泥砂/砂泥岩含量评价;分辨油、气、水层以及油/气、油/水界面,指导钻井施工;判断地层变化,准确进行地质评价;分辨薄的油气层,有效开发地下油气资源;预测轨迹在油层中行进的情况,实时指导钻井施工;取消中途及完井电测,节约投资,提高施工效率;判断岩性等。

我国对地质导向钻井技术的研究和应用还处于初级阶段,地质导向测量仪器多为国外引进,价格昂贵,使用和维护成本较高,并且由于随钻岩性密度、中子孔隙度测量带有放射源,使用风险高,多参数LWD全套参数同时使用的情况并不普遍,更多情况下还是使用带有自然伽马和电阻率的双参数LWD仪器。

胜利油田通过“九五”特殊工艺井钻井技术攻关,在引进FEWD及双参数LWD的基础上,2003~2005年胜利钻井院开展了地质导向钻井技术研究工作,并承担完成了中石化“十条龙”项目“地质导向钻井技术研究”。研制成功了具有我国自主知识产权的新型MWD、带随钻自然伽马和随钻电阻率参数的LWD,形成了用于地质导向的双参数LWD仪器设计制造技术;申请发明专利和实用新型专利6项。2006年随钻测井核心探测技术研究被列为国家863“十一五”重点攻关项目,开展对岩性密度、中子孔隙度及声波随钻测井工具及技术的研发。通过自主创新,研发具有我国自主知识产权的旋转地质导向钻井技术,实现地质导向测量仪器国产化,打破国外垄断,缩小技术差距,满足复杂油气藏勘探开发需求,提高我国地质导向钻井整体水平和国际竞争力,使得钻井队伍进入国际技术服务市场。

3 正在发展的自动化智能化钻井技术

3.1 随钻地震技术

随钻地震技术(Seismic While Drilling,简称SWD)是地震勘探技术与石油钻井工程相结合的产物,是国外近年发展起来的逆垂直地震测井的井中地震方法。

斯伦贝谢公司1991年在德国的Mulmshorn地区用地面24个检波器组合,240道接收进行了随钻地震的试验,取得了很好的效果。2004年,该公司研制的新型可视化随钻地震系统(SED),已成功投入现场使用。钻井时,将系统安装在钻头附近,提供实时钻进时的检炮点、层速度。系统装置中的地震波形分析器实时将钻头附近的地层转换成图片形式,供现场工程师使用。在此以前,如果要得到地层的相关资料,必须起钻后下电缆测井。这一新型系统,可大大节省钻井费用。目前,这套系统在现场使用的最大井深为2500m。斯伦贝谢公司现在已经能够结合随钻地震技术,提供各种无风险钻井服务(NDS),即针对多个专业领域有效地预测钻井风险,从而主动地解决这些问题,避免出现被动的局面,包括井眼压力控制和孔隙压力预测,井眼稳定性控制,地层整体性和地层性质等。

斯伦贝谢公司从上世纪90年代初对随钻RVSP技术开始进行研究。主要是将表面地震数据同随钻数据相结合实时纠正储层位置,确定储层真实位置。利用随钻地震数据与表面地震数据进行比较,找出随着深度的变化,压力的变化点位置,利用这些信息可以确定套管的选择、地质导向、斜井应用、深水应用等五个主要方面进行了研究,取得了较好的效果。

随钻地震主要可分为两类:随钻RVSP和随钻VSP。随钻RVSP是以钻井作业中钻头破岩时产生的振动作为地下震源,通过安装在井架和钻杆顶端的传感器采集由钻杆传送上来的钻头振动信号,并通过地面测线上的检波器排列采集经地层传播上来的钻头信号的直达波和反射波。由钻杆上采集到的信号通常称为参考信号或导航信号,将参考信号经过预处理后与地面检波器的信号进行互相关和时移以及各种去噪处理后,进行地层特征评价。

随钻VSP技术的实质是钻进过程中的垂直地震剖面(VSP),为最近几年研发,所见公开报道不多,仅有法国IFP公司从2000年开始研究过。其过程是在地面产生地震波,由钻铤内的检波器接收、记录,然后把数据传到地面分析处理。

与常规VSP相比,随钻地震技术具有实时测

量、简化施工、经济、实用等许多优越性。

目前国外随钻地震技术已在50多口井上试验应用,并取得了良好的效果。国内中石化胜利钻井院与国家地震局地球物理研究所、胜利物探公司、郑州物探局等单位合作自2005年开始了技术的研究攻关,2007年随钻地震技术被列为国家863“十一五”重点攻关项目,对随钻地震信号采集技术、随钻地震信号处理技术以及随钻地震信息工程应用技进行全面研究攻关,目前已在系统构建、仪器研制及信号处理等方面取得了突破性进展,并集成现有成熟设备,完成了5口井的现场试验,取得了大量的基础数据,为下一步的研究打下了坚实的基础。

3.2 近钻头参数测量技术

在现代石油钻井中,先进的仪器、工具是实现安全、快速钻井的重要组成部分,特别是井底钻头附近的钻柱运动情况、钻头工作状况、钻井液性能及井下各种情况都仪表化、通过不同的传感器存储到芯片中起钻回放,或通过各种方式随钻测量系统及时返回地面,钻井工程师根据测量的各种数据综合判断井下情况,然后调整措施优化钻井措施,提高钻井速度,防止井下事故的发生。测压接头(PWT)入井接在钻柱的不同位置或近钻头处,可以测量井下钻压、接头处内外压力及压差、扭矩和振动等参数,根据这些参数可以井下状况判断,是实现安全、快速钻井的重要工具。

通过该技术提供的井下实际工作参数可以对现有的井下摩阻分析模型、井眼轨迹控制模型、井眼轨道设计模型进行有效的改进、升级,从而可为大位移井、复杂结构井的钻井工程设计和施工提供有效的技术支持。

3.3 智能钻杆技术

随着旋转导向钻井技术、地质导向钻井技术以及随钻地震技术的不断发展,钻井液脉冲信息传输技术远远不能满足井下随钻测量数据的实时传输,并成为制约钻井新技术发展与应用的瓶颈。智能钻杆技术可解决钻井过程中实时数据传输速率低的瓶颈问题,实现高速数据传输,它的问世是对油气钻探方式的一次革命。该技术可以实现钻井信息实时分析评价以及钻井过程的实时、高速导航,对节省钻井时间和钻井成本具有重要意义。

根据传输方式的不同,目前已在现场测试应用的智能钻杆传输技术可分为对接式和感应接头式两种。Grant Predico公司与Nevotek公司从2000年开始合作开发的感应接头式智能钻杆Intelipipe。

研制的智能钻杆从 2002 年至 2005 年共在 5 口井上进行了现场测试试验,传输数据速率可达 1 Mbit/s,电子数据同时传输的速率也可达 100 Kbits/s^[3]。这种智能钻杆的双向传递结构不仅能把井下的信息高速地传到地面,而且地面的指令也能快速地传到井下工具上,甚至井下工具之间也可以相互传递、接收和执行指令。该系统主要由钻杆和钻铤、信号中继短节、顶驱旋转短节等几部分组成。该系统 2006 年初开始了商业化应用。它的问世,被誉为是对油气钻探方式的一次革命、近 25 年来钻井技术最重大的进步之一。

4 认识及建议

(1) 自动化智能化钻井技术是现代钻井的最终发展方向,随着自动化智能化钻井技术的不断完善,适应能力在不断增强,应用范围在不断扩大,该技术必将在油田勘探开发后期实现大位移井、长水平段水平井、三维多目标井等特殊工艺井方面发挥越来越重要的作用。

(2) 随钻地震作为钻井过程实时监测的手段,能及时为钻井工程师和决策者提供相关信息,作为一种新的低成本的勘探手段,能为油田勘探开发或储层描述提供更准确的实时信息。

(3) 旋转导向钻井技术为钻头装上了“方向盘”,地质导向钻井技术为钻头安装了“眼睛”,综合利用随钻地震技术、信息传输技术、数据处理分析及专家系统等技术集成,完善和优化钻井工艺技术,达到减少钻进事故、提高钻井速度、降低钻井成本目的。

(4) 实现钻井自动化要涉及许多方面,它是一个学科门类多、技术复杂的系统工程,目前的各项研究成果正在朝着实现钻井自动化智能化的目标靠近。发展完善集成导向钻井、随钻地震、实时传输和专家分析处理等钻井新技术,形成闭环钻井系统;并配套完善地面自动化及操作系统是钻井工程发展的目标,从而最终实现自动化智能化钻井,为油气田的勘探开发提供有效的钻探手段。

参考文献

- 1 Geoff Downton. The new direction of rotary steering drilling[J]. Oilfield Review, 2000, Spring: 18~29
- 2 Urayama T. Development of remote - controlled dynamic orientating system[C]. SPE 56443, 1999
- 3 Michael J, Jellison. Telemetry drill pipe: enabling technology for the downhole internet[C]. SPE 79885, 2003

编辑:李金华

.....

(上接第 92 页)

制缝内净压力值等措施实现降滤目标。

(2) 通过室内实验,调试出 GN2-110 压裂液,粘度保持在 380~400 mPa·s,高于前期压裂液体系,能够有效降低液体滤失系数。

(3) 升降排量测试压裂能够准确反映不同排量下,净压力变化趋势。最优排量应在现有工程技术条件下,选择能保持净压力平稳的施工排量,保证入地液量稍大于滤失液量。

(4) 为了要使天然裂缝被有效填充,且尽量保证裂缝导流能力,应该根据测试压裂分析结果,采用不同施工压力分批次打开天然裂缝,并采用支撑剂粒径从小到大进行段塞。

参考文献

- 1 刘唯贤,蒲仁瑞. 压裂砂堵机理研究及预防技术[J]. 内蒙古石油化工, 2007, (9): 91~92
- 2 任岚,胡永全,赵金洲等. 高渗透地层压裂液滤失模型研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 116~118
- 3 陈定珊. 压裂液滤失机理研究[J]. 石油钻采工艺, 1986, (3): 76~79
- 4 李宜强,魏铁军. SMA 强凝胶封堵裂缝性砂岩性能研究[J]. 西安石油大学学报, 2006, 21(4): 62~64
- 5 沈建国,陆灯云,刘同斌. 支撑剂段塞冲刷的水力压裂新工艺[J]. 天然气工业, 2003, 23(增刊): 92~94
- 6 罗天雨,王嘉淮,赵金洲等. 多裂缝防治措施研究[J]. 断块油气田, 2006, 13(6): 40~42

编辑:李金华