

# 胜利油田水平井地质导向钻井技术

闫振来 韩来聚 李作会 赵金海 杨锦舟

(胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

**摘要:**通过理论研究、仪器研制和软件开发,自行研制了具有自主知识产权的新型 MWD、随钻自然伽马测量仪、随钻电阻率测量仪以及国内第一个移动式随钻自然伽马测井标准刻度装置,形成了地质导向双参数 LWD 仪器设计制造技术和地质导向钻井工艺配套技术。该技术在 50 余口井地质导向钻井中进行了成功应用,开发的最小有效油层厚度 0.8 m,平均油层有效延伸率达 94% 以上,将井眼轨迹控制标准由原来几何导向的“工程中靶”提升为“地质中靶”,降低了因地质目标不确定性而带来的钻探风险,为薄油层、厚油层顶部剩余油等复杂油气藏开发提供了技术支撑。

**关键词:**水平井;地质导向;导向钻井;随钻测量;随钻测井;自然伽马测井;胜利油田

**中图分类号:**TE243    **文献标识码:**B    **文章编号:**1001-0890(2008)01-0004-05

## 引言

地质导向钻井技术是 20 世纪 90 年代在世界范围内勘探开发面临复杂地质条件、随钻测量技术日趋成熟背景下发展起来的钻井前沿技术之一,是地质信息、随钻测井仪器响应和用于引导井眼进入目的层并保持在目的层内的解释技术的综合<sup>[1]</sup>。目前,国外的地质导向钻井技术已经相当成熟,能够实时测量近钻头处的多种地质参数和工程参数,进行钻井效率和风险管理的实时决策,使井眼轨迹沿储层最佳部位钻进,而国内因仪器研制与技术研究起步较晚,基本上处于国外第一代产品的初期水平<sup>[2-3]</sup>。因此,瞄准国际前沿技术,开展满足中国需要的地质导向钻井技术研究与应用工作已迫在眉睫<sup>[4]</sup>。

胜利油田存在大量的复杂断块油藏、隐蔽油藏、薄油藏和老油田长期开采剩余的边底水构造油藏等复杂油气藏<sup>[5-6]</sup>,而地质导向钻井技术可为开发这些利用常规钻井技术难以开采的复杂油气藏提供强有力的技术支撑。为此,1999 年胜利油田引进了美国 Halliburton 公司带 4 道地质参数的随钻地层评价仪器和英国 Geolink 公司带自然伽马和电阻率 2 道地质参数的地质导向测量工具,并在胜利油田边底水剩余油区块和塔里木油田超薄油藏区块进行了应用<sup>[7-8]</sup>,且应用效果良好,为地质导向钻井技术研究

与应用奠定了良好基础。由于国外先进的地质导向钻井系统等前沿钻井技术至今仍实施技术垄断政策——只租借不出售,日租金高达数万甚至数十万美元,而且不可能得到地质导向钻井核心技术。因此,为了尽快打破国外技术垄断,赶超国际钻井先进水平,2001—2005 年,胜利油田钻井院成功研制了具有自主知识产权的新型 MWD、随钻自然伽马测量仪、随钻感应电阻率测量仪以及配套应用软件,形成了地质导向双参数 LWD 仪器设计制造技术和地质导向钻井工艺配套技术,并在 50 余口井的现场应用中取得了良好效果。

## 1 地质导向钻井测量仪器

胜利油田研制的地质导向测量仪主要由 LWD(井下自然伽马、电阻率测量仪)与 MWD、地面数据处理系统和钻井液脉冲遥测系统 3 部分组成。水平

收稿日期:2007-08-08;改回日期:2007-09-30

基金项目:“十五”国家科技攻关项目“复杂油气藏配套钻井技术及关键装备研究”(编号:2003BA613A-11)和中国石化集团“十条龙”科技攻关项目“地质导向钻井技术研究”(编号:JP03009)部分研究成果

作者简介:闫振来(1965—),男,1988 年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,2005 年获中国石油大学石油与天然气专业工程硕士学位,高级工程师,钻井工艺研究所副所长兼主任工程师,现主要从事钻井工艺研究和复杂结构井钻井新技术的推广应用工作。

联系电话:(0546)8501218

井钻井时,带自然伽马、电阻率两道地质参数的 LWD 与 MWD 配合使用,共同完成地质参数和工程参数的实时测量。实践表明,胜利油田钻井院生

产的 SL-MFQ 型 MWD、随钻自然伽马和随钻电阻率测量仪的性能指标已经达到了国外同类产品的先进技术水平(见表 1)。

表 1 胜利油田地质导向仪器与国外仪器主要技术经济指标对比

研发单位	井斜角精度/(°)	方位角精度/(°)	重力工具面精度/(°)	磁性工具面精度/(°)	最高工作温度/°C	节能模式	电阻率/Ω·m	自然伽马
Schlumberger	±0.10	±1.0	±0.5	±1.0	150	有	0.2~2 000.0	0~500
Halliburton	±0.15	±1.5	±2.5	±2.5	150	有	0.2~2 000.0	0~500
Baker Hughes	±0.10	±1.0	±0.5	±1.0	150	有	0.2~2 000.0	0~500
Geolink	±0.10	±1.0	±0.5	±1.0	150	有	0.2~2 000.0	0~500
胜利钻井院	±0.10	±1.0	±0.5	±1.0	150	有	0.2~2 000.0	0~500

## 1.1 旋转阀式 MWD 无线随钻测量仪的研制

1)增强 MWD 系统的可靠性。一是对仪器的硬件电路、控制方法和制造工艺进行了重点改进,提高了 MWD 温度特性指标,增强了系统的耐高温能力,能够满足大多数井下环境温度的应用要求;二是对井下仪器的机械连接结构作了重大改进和创新,不但能够保证电气连接的可靠性,更重要的是使仪器的抗冲刷能力大大增强。

2)提高参数测量的实时性。针对 MWD/LWD 传输参数增多,必须提高数据传输速率以满足实时测量的要求,对井下测量探管控制部分进行了改进,能够控制仪器根据不同测量模式自动调整数据传输编码方式,从而增强了系统的实时性,并提高了随钻测量仪器在深井中的信号传输能力。

## 1.2 随钻自然伽马测量仪的研制

1)随钻伽马测量实现技术。研究开发了具有数字滤波处理功能的随钻伽马测量仪井下测量软件,建立了自然伽马放射性测量数据误差分析方法。

2)井下工具智能模式控制方法。建立了智能测量数据平台,实现了多工作模式下可靠的数据自动交换技术。

3)地面数据处理方法。建立了基于现场实际工况的多阶非线性深度校正模型,实现了井深的高精度测量,并形成了一套测量信号的实时检测和处理方法。

4)井下测量短节和地面数据采集系统。研制了自然伽马测量仪井下测量短节,开发了地面实时数据处理软件。

## 1.3 随钻电阻率测量仪的研制

1)数学模型。通过数字计算和仿真,考察了有

金属钻铤时发射线圈产生的电磁场在井眼周围分布和钻铤对感应测量信号的影响,建立了方位感应电阻率钻铤响应计算方法。

2)连接结构。通过对钻铤的整体结构、强度计算、线圈系安装结构、连接机构和线圈系防护层结构及工艺等的研究,设计出了既能够实现总体技术指标,又能够适应恶劣井下环境的电阻率测量短节。

3)硬件电路设计及软件开发。a. 利用趋肤效应校正方法,对传播效应引起的测量信号与地层电阻率响应之间的非线性关系进行了修正,使测量响应更能反映地层的真实情况;b. 在反褶积滤波方法研究中,根据仪器结构特点及线圈系特性,建立了被测地层的物理参数与仪器读数之间的关系,将仪器测量得到的电压信号准确转换为地层电导率,使围岩对测量响应的影响减弱,从而进一步提高测井响应的分层能力和提高探测深度;c. 数字相敏检波方法实现了对接收线圈中两种测量信号的准确分离,突出了与地层电导率计算密切相关的信号的作用,同时消除了线圈系误差产生的寄生信号,从而提高了仪器的测量精度;d. 根据仪器结构特点及线圈系特性,建立了适用于该仪器的刻度方法,开发出了随钻电阻率井下测量仪。

## 1.4 测量参数实时处理系统软件的开发

1)实时信号检测技术。根据钻井液脉冲编码规则,使用并口驱动,在 Windows 操作系统环境下对硬件直接操作,从而实现 MWD 实时信号的检测。

2)实时数据处理技术。为适应仪器多种工作模式的数据结构,根据系统特性,采用多文件的数据存储,以便对不同的测量数据进行处理(包括数据回放、图形显示及曲线输出)。

3)开发了 Windows2000 操作系统下的 LWD 系统软件。以 LAS 格式为标准,解决了地质数据标

准兼容问题,做到与国外著名软件数据格式相容,实现数据、解释/查询与操作一体化。

### 1.5 地质测量参数刻度的研究

目前随钻伽马、电阻率与电缆测井仪器的响应量值难以达到完全统一。由于随钻测井仪器的响应、井眼修正是非线性的,因此必须建立随钻测井仪器的刻度井,进行标准化刻度及量值传递研究。胜利油田钻井院已经成功研制出国内第一个移动式随钻自然伽马测井标准刻度装置,目前正在随钻电阻率测量仪刻度井的研制<sup>[9]</sup>。

## 2 地质导向钻井工艺技术

为了在现有仪器基础上有效实施地质导向钻井,进一步提高井眼轨迹在油层中的有效穿透率和油气采收率,弥补国内地质导向工具测量传感器距离钻头较远、应用软件系统存在空白等实际差距,胜利油田主要围绕水平井地质导向测量参数随钻解释系统、基于地质导向的水平井待钻井眼轨道校正设计、地质导向钻井随钻预测理论与方法和基于地质导向的井眼轨道设计与井眼轨迹控制软件研制等4个方面进行了深入研究。

### 2.1 水平井地质导向测量参数随钻解释系统

结合 LWD 仪器在胜利油田的实际应用情况,以带自然伽马和电阻率 2 道参数的 LWD 系统为依托,以实时地质参数为研究对象,以地质测量参数实时解释为研究目标,研制开发了水平井地质导向测量参数随钻解释系统。主要成果有:1)通过开展随钻测井资料标准化和斜井校正方法研究,实现了 LWD 曲线与直井曲线的对比分析;2)利用随钻测井资料与相邻井对应层位测井曲线上具有相似性的相关对比技术,从方差分析和极值分析的角度出发,采用一种直观实用的适合于对称型和非对称型两类曲线分层的数理统计法——极值方差聚类分层法,完成了在钻井的储层自动划分以及与邻井层位的对比连线;3)根据目前随钻测井资料不全的实际情况,综合利用在钻井自然伽马、电阻率和邻井资料,建立了无孔隙度测井资料条件下的孔隙度解释模型,实现了本井钻遇地层孔隙度、渗透率和饱和度等储层参数的计算和储层评价以及流体性质判别,进而实现了随钻测井资料的实时解释。

在理论分析和方法研究基础上研制的水平井地

质导向测量参数随钻解释系统,具有水平井测井资料标准化与斜井校正、地层对比、储层参数解释和流体性质判别等功能以及设计新颖、操作简便、功能强大等特点,为井场随钻测井资料的实时解释提供了强有力的工具和平台,同时也为水平井地质导向钻井提供了有力的技术支撑。应用结果表明,水平井地质导向测量参数随钻解释系统能够较好地指导油气藏评价和水平井地质导向钻井施工。

### 2.2 水平井待钻井眼轨道校正设计

基于地质导向的水平井待钻井眼轨道校正设计是地质导向钻井工艺技术的重要内容之一。在水平井地质导向钻井时,不仅应满足矢量中靶要求,而且要求中靶偏差很小(因为油藏薄而小)。然而,地质导向钻井的靶点位置具有不确定性,无法像几何导向钻井那样直接进行待钻轨道设计,断层、岩性尖灭、地层缺失和油藏薄等情况使得水平井准确中靶难度进一步加大。合理的待钻井眼轨道校正设计可以在一定程度上降低中靶难度,提高钻井成功率。

通过研究,提出了一套准确而实用的中靶优化设计方法和基于油藏可视化的轨道设计方法,开发出了相应的理论模型和计算模块,解决了基于地质导向的水平井待钻井眼轨道校正设计问题。同时,对待钻轨道设计和靶区轨道设计的各种情况进行了分析,将任意情况下的轨道设计分解为 8 个基本计算模块,通过调用某个计算模块或某些计算模块的组合可以完成任意待钻轨道和靶区轨道设计。主要成果有:1)建立了油层垂深不确定条件下以“油层穿透率最高”为目标的地质导向水平井中靶优化设计模型,开发出了相应的优化设计模块,有利于提高靶区水平段油层穿透率;2)建立了地质导向水平井轨道参数优选模型,使设计轨道具有最大的适应油层垂深不确定性的能力;3)提出了弹性杆挠曲线法设计多目标靶区轨道的新概念和弹性杆挠曲线法靶区轨道设计方法,建立了理论计算模型,开发了相应的计算模块,并与其他方法一起形成了完整的多目标井靶区轨道设计方法;4)针对水平井矢量靶的特点,建立了水平井待钻井眼轨道校正设计理论模型,开发了相应的设计模块,解决了水平井待钻井眼轨道校正设计中的矢量中靶问题;5)改进并完善了摩阻扭矩计算理论模型,开发了管柱在井眼中的摩阻扭矩分析计算模块<sup>[10]</sup>。

### 2.3 地质导向钻井随钻预测理论与方法

目前,我国通常应用的地质导向仪器的测量传

传感器普遍距离钻头较远(约为 8~20 m),一般情况下电阻率距离钻头最近,伽马和(或)其他地质参数次之,井眼姿态测量传感器距离钻头最远,如图 1 所示。这就严重制约了钻头处工程和地质参数的准确获取,也不利于井眼轨迹在油层中的有效穿行。地质导向钻井随钻预测理论与方法研究重点对井眼轨迹参数随钻估计和预测、导向标志层随钻预测、目标层随钻预测、地质导向钻井随钻预测软件进行了研究。主要成果有:

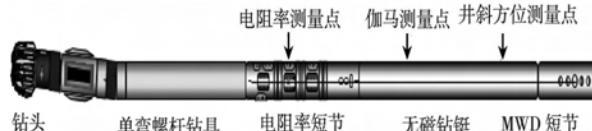


图 1 带 LWD 的常用地质导向钻井 BHA 示意图

1)提出了基于 Kalman 滤波的井眼轨迹参数实时估计和预测新方法,以及基于支撑向量机统计学习理论的井眼轨迹预测新方法。实践表明,轨迹预测新方法不仅提高了 BHA 测点零长的轨迹预测精度,还可以进一步预测待钻井眼轨道,具有良好的应用前景。

2)地层可钻性级值( $K_d$ )反应了钻头所在地层的岩性,在钻井的过程中通过获取  $K_d$ ,可以实时判断钻头是否钻遇盖层或是否穿出目标层。通过研究地层可钻性随钻估计问题,提出了基于遗传算法的地层可钻性级值估计理论与方法,以便利用地层可钻性作为判断钻头是否在目标层钻进的依据。

3)在薄油层或有复杂褶皱、断层的油藏中,如何确定目标层的位置、走向和厚度是地质导向钻井急需解决的一个关键问题。利用 Bayes 估计理论对地质导向钻井三维地层建模和随钻实时修正方法进行了深入研究,提出了基于 Bayes 估计理论的三维地层建模和随钻实时修正方法,并利用模拟数据进行了验证。

4)提出了基于小波变换和沃尔什变换的测井曲线分层新方法<sup>[11]</sup>。

## 2.4 井眼轨道设计与井眼轨迹控制软件

在常规水平井井眼轨道设计和井眼轨迹控制软件基础上,通过集成和衔接相关功能性模块,编制出了基于地质导向的水平井井眼轨道设计和井眼轨迹控制程序,构建出了地质导向钻井系统平台。该平台除具有水平井井眼轨道设计和井眼轨迹控制程序的全部功能外,增加了基于地质导向钻井的现场实时数据资源共享和远程实时决策、LWD 曲线实时

显示、地质导向测量参数随钻解释、待钻井眼轨道校正设计及地质导向钻井三维可视化等多个功能性实用控件,能够把钻井现场数据及时传送到基地服务器及各相关终端上,并将后续作业指令实时返回到系统平台,实现现场实时数据资源共享和远程实时决策、随钻解释、真三维显示等功能,承担着地质导向钻井软件平台的作用<sup>[12]</sup>。

## 3 水平井地质导向技术的应用

以地质导向测量工具为依托,以地质导向随钻解释和地质—钻井一体化设计施工软件为手段,就钻具组合优化设计、钻井参数优选技术、随钻跟踪地质目标的井眼轨迹预测和控制技术等内容开展了地质导向钻井工艺技术应用研究,形成了具有胜利油田特色的地质导向钻井工艺配套技术和现场应用技术。

地质导向钻井工艺配套技术的六项主要技术为:1)基于地质—钻井设计施工一体化的地质导向水平井钻井设计技术;2)基于地质导向钻井的测点零长信息实时估计和预测技术;3)地层界面、油气水界面识别及地质信息解释技术;4)基于地质导向的待钻井眼轨道校正设计技术;5)地质导向水平井井眼轨迹控制技术;6)现场实时数据远程传输及多学科专家协同工作的实时决策技术。

现场应用技术的六项主要技术:1)地质导向钻井工艺配套技术;2)地质导向水平井钻井钻具组合优化设计技术;3)水平井地质导向井眼轨迹控制施工方案;4)水平井着陆前井眼轨迹控制技术;5)水平井着陆段井眼轨迹控制技术;6)水平井地质导向钻井工艺技术措施。

目前,胜利油田应用自行研制的新型正脉冲 MWD 和自然伽马测量系统,配合引进或自行研制的随钻电阻率测量仪<sup>[12-13]</sup>,在胜利、江苏、江汉、华北、塔里木、大庆和冀东等油田已经完成了 50 余口厚度小于 2 m 的薄油层水平井的地质导向钻井施工,最小有效油层厚度 0.8 m,为薄油层、厚油层顶部剩余油等复杂油气藏开发提供了技术支撑,应用效果良好<sup>[14-16]</sup>。而且,水平井地质导向钻井技术将井眼轨迹控制标准由原来几何导向的“工程中靶”上升为“地质中靶”,大大降低了因地质目标不确定性而带来的钻探风险,大幅度提高了复杂油气藏的开发成功率,具有巨大的社会经济效益。

## 4 认识与体会

1)自行研制了具有自主知识产权的新型 MWD、随钻自然伽马测量仪、随钻电阻率测量仪、配套应用软件以及国内第一个移动式随钻自然伽马测井标准刻度装置,形成了地质导向双参数 LWD 仪器设计制造技术和地质导向钻井工艺配套技术,填补了国内地质导向钻井系统长期依赖进口的技术空白。

2)实践表明,自行研制的带 2 道地质参数的地质导向钻井系统与具有胜利油田特色的地质导向钻井工艺配套技术的有机结合,成功实施了地质导向钻井,为薄油层、厚油层顶部剩余油等复杂油气藏开发提供了技术支撑,应用效果良好;水平井地质导向钻井技术将井眼轨迹控制标准由原来几何导向的“工程中靶”上升为“地质中靶”,大大降低了因地质目标不确定性而带来的钻探风险,大幅度提高了复杂油气藏的开发成功率。

3)由众多功能性模块集成构建的地质导向钻井系统平台在地质导向钻井中真正起到了地质导向钻井软件平台的作用,现场工程师可以在同一平台上进行轨迹控制、随钻解释、远程传输与决策、待钻设计等操作,设计新颖,功能强大,兼容性与可操作性强。

4)具有自主软件著作权的水平井地质导向测量参数随钻解释系统在指导油气藏评价和薄油层水平井地质导向钻井施工方面具有重要作用,具有较高的推广应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 江国法. 地质导向[J]. 测井技术信息, 2000, 13(1): 14-23.
- [2] 王同良. 国外水平井大位移井钻井技术新进展[J]. 世界石油工业, 1997, 1(1): 37-41.
- [3] 林广辉. 地质导向系统的研究与应用[J]. 中国海上油气(工程), 2000, 12(5): 39-47.
- [4] 孙清德. 中国石化集团钻井技术现状及愿望[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(2): 1-6.
- [5] 张桂林. 胜利油田水平井钻井技术现状与发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(2): 66-70.
- [6] 赵景山. 胜利油田薄油层水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 72-74.
- [7] 王爱国, 王敏生, 唐志军, 等. 深部薄油层双阶梯水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(3): 13-15.
- [8] 孙海芳, 贺兆顺, 杨成新. 超薄油藏水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(4): 15-17.
- [9] 杨锦舟, 肖红兵, 张海花. 随钻自然伽马刻度装置及量值传递研究[J]. 石油仪器, 2004, 18(5): 24-26.
- [10] 黄根炉, 赵金海, 赵金洲, 等. 基于地质导向的水平井中靶优化设计[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(6): 1-3.
- [11] 王延江, 杨培杰, 史清江, 等. 一种基于支撑向量机学习预测井眼轨迹的新方法[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 98-101.
- [12] 蔡文军, 王平, 翟军威, 等. 机械式随钻测斜仪及其应用[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 39-40.
- [13] 刘以明, 蔡文军, 王平, 等. Power V 和机械式随钻测斜仪在黑池 1 井的应用[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1): 71-73.
- [14] 赵金海, 闫振来, 冯光通, 等. 地质导向钻井技术在埕 71-平 4 井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(1): 9-12, 13.
- [15] 杨锦舟. 基于随钻自然伽马、电阻率的地质导向系统及应用 [C]// 第五届石油钻井院院长会议论文集编委会. 第五届石油钻井院院长会议论文集. 北京: 石油工业出版社, 2006: 124-127.
- [16] 闫振来, 赵金海, 刘勇, 等. 胜利油田地质导向钻井工艺技术研究进展[C]// 第五届石油钻井院院长会议论文集编委会. 第五届石油钻井院院长会议论文集. 北京: 石油工业出版社, 2006: 86-89.

## Geo-Steering Drilling Technique of Horizontal Wells in Shengli Oilfield

Yan Zhenlai Han Laiju Li Zuohui Zhao Jinhai Yang Jinzhou

(Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying, Shandong, 257017, China)

**Abstract:** A new MWD, a gamma ray measurement while drilling tool, and the first mobile gamma ray logging master scale device have been developed with independent intellectual property based on theoretical study along with instrument and software development. These instruments established double-parameter LWD design and manufacture technique and geo-steering drilling technology. The geo-steering drilling technique had been successfully used in more than 50 wells, among which the thinnest reservoir was less than 0.8 meter and the average efficient extensibility in reservoir was more than 94%. The criteria of wellbore trajectory control improved from engineering target to geology target, reducing the exploitation risk caused by the uncertainty of geology target and providing technical support to thin reservoir and remaining oil in the upper section of thick reservoir.

**Key words:** horizontal well; geologic steering; navigational drilling; measurements while drilling; logging while drilling; gamma ray logging; Shengli Oilfield