

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助



复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏随钻 测井与地质导向

刘红岐 夏宏泉 吴宝玉 编著



科学出版社

复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏随钻测井与地质导向

刘红岐 夏宏泉 吴宝玉 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

智能导向钻井与随钻测井技术已成为 21 世纪智能钻井和测井以及实时储层评价的最先进应用技术,是高效、安全勘探和开发复杂油气藏必不可少的应用技术,也是油田现场工程师必须掌握的一门应用技术。本书按照地质导向与随钻测井发展的历史进程,系统详细地介绍旋转导向、地质导向、随钻测量、随钻电阻率测井、随钻声波测井、随钻地震、随钻放射性测井、随钻核磁共振测井以及随钻地层压力测试等先进技术。

本书可供油田地质、录井、物探和测井,以及钻井与油藏开发等专业的教师、科研人员、现场操作工程师等查阅,也可以作为石油高校勘探与开发相关专业学生的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂油气藏随钻测井与地质导向/刘红岐,夏宏泉,吴宝玉编著. —北京:科学出版社,2017.3

(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042922-3

I. ①复… II. ①刘… ②夏… ③吴… III. ①复杂地层-油气钻井-导向钻井-研究 IV. ①TE242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 309704 号

责任编辑:张 展 罗 莉/责任校对:邓丽娜

责任印制:罗 科/封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100077

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:359 500

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

石油和天然气是社会经济发展的重要基础和主要动力,油气供应安全事关我国实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴中国梦的全局。但我国油气资源约束日益加剧,供需矛盾日益突出,对外依存度越来越高,原油对外依存度已达到 60.6%,天然气对外依存度已达 32.7%,油气安全形势越来越严峻,已对国家经济社会发展形成了严重制约。

为此,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》对油气工业科技进步和持续发展提出了重大需求和战略目标,将“复杂地质油气资源勘探开发利用”列为位于 11 个重点领域之首的能源领域的优先主题,部署了我国科技发展重中之重的 16 个重大专项之一“大型油气田及煤层气开发”。

国家《能源发展“十一五”规划》指出要优先发展复杂地质条件油气资源勘探开发、海洋油气资源勘探开发和煤层气开发等技术,重点发展天然气水合物地质理论、资源勘探开发和安全开采技术。国家《能源发展“十二五”规划》指出要突破关键勘探开发技术,着力突破煤层气、页岩气等非常规油气资源开发技术瓶颈,达到或超过世界先进水平

这些重大需求和战略目标都属于复杂油气藏勘探与开发的范畴,是国内外油气田勘探开发工程界未能很好解决的重大技术难题,也是世界油气科学技术研究的前沿。

油气藏地质及开发工程国家重点实验室是我国油气工业上游领域的第一个国家重点实验室,也是我国最先一批国家重点实验室之一。实验室一直致力于建立复杂油气藏勘探开发理论及技术体系,以引领油气勘探开发学科发展、促进油气勘探开发科技进步、支撑油气工业持续发展为主要目标,以我国特别是西部复杂常规油气藏、深海油气以及页岩气、煤层气、天然气水合物等非常规油气资源为对象,以“发现油气藏、认识油气藏、开发油气藏、保护油气藏、改造油气藏”为主线,油气并举、海陆结合、气为特色,瞄准勘探开发科学前沿,开展应用基础研究,向基础研究和技术创新两头延伸,解决油气勘探开发领域关键科学和技术问题,为提高我国油气勘探开发技术的核心竞争力和推动油气工业持续发展作出了重大贡献。

近十年来,实验室紧紧围绕上述重大需求和战略目标,掌握学科发展方向,熟知阻碍油气勘探开发的重大技术难题,凝炼出其中基础科学问题,开展基础和应用基础研究,取得理论创新成果,在此基础上与三大国家石油公司密切合作承担国家重大科研和重大工程任务,产生新方法,研发新材料、新产品,建立新工艺,形成新的核心关键技术,以解决重大工程技术难题为抓手,促进油气勘探开发科学进步和技术发展。在基本覆盖石油与天然气勘探开发学科前沿研究领域的主要内容以及油气工业长远发展急需解决的主要问题的含油气盆地动力学及油气成藏理论、油气储层地质学、复杂油气藏地球物理

勘探理论与方法、复杂油气藏开发理论与方法、复杂油气藏钻完井基础理论与关键技术、复杂油气藏增产改造及提高采收率基础理论与关键技术以及深海天然气水合物开发理论及关键技术等方面形成了鲜明特色和优势,持续产生了一批有重大影响的研究成果和重大关键技术并实现工业化应用,取得了显著经济和社会效益。

我们组织编写的“复杂油气藏开发丛书”包括《页岩气藏缝网压裂数值模拟》《复杂油气藏储层改造基础理论与技术》《页岩气渗流机理及数值模拟》《复杂油气藏随钻测井与地质导向》《复杂油气藏相态理论与应用》《特殊油气藏井筒完整性与安全》《复杂油气藏渗流理论与应用》《复杂油气藏钻井理论与应用》《复杂油气藏固井液技术研究与应用》《复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践》《复杂油藏化学驱提高采收率》等 11 本专著,综合反映了油气藏地质及开发工程国家重点实验室在油气开发方面的部分研究成果。希望这套丛书能为从事相关研究的科技人员提供有价值的参考资料,为提高我国复杂油气藏开发水平发挥应有的作用。

丛书涉及研究方向多、内容广,尽管作者们精心策划和编写、力求完美,但由于水平所限,难免有遗漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

国家《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》将稳步提高国内石油产量和大力发展天然气列为主要任务,迫切需要稳定东部老油田产量、实现西部增储上产、加快海洋石油开发、大力支持低品位资源开发、加快常规天然气勘探开发、重点突破页岩气和煤层气开发、加大天然气水合物勘探开发技术攻关力度并推进试采工程。国家《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》将非常规油气和深层、深海油气开发技术创新列为重点任务,提出要深入开展页岩油气地质理论及勘探技术、油气藏工程、水平井钻完井、压裂改造技术研究并自主研发钻完井关键装备与材料,完善煤层气勘探开发技术体系,实现页岩油气、煤层气等非常规油气的高效开发;突破天然气水合物勘探开发基础理论和关键技术,开展先导钻探和试采试验;掌握深—超深层油气勘探开发关键技术,勘探开发埋深突破 8000 m 领域,形成 6000~7000 m 有效开发成熟技术体系,勘探开发技术水平总体达到国际领先;全面提升深海油气钻采工程技术水平及装备自主建造能力,实现 3000 m、4000 m 超深水油气田的自主开发。近日颁布的《国家创新驱动发展战略纲要》将开发深海深地等复杂条件下的油气矿产资源勘探开采技术、开展页岩气等非常规油气勘探开发综合技术示范列为重点战略任务,提出继续加快实施已部署的国家油气科技重大专项。

这些都是油气藏地质及开发工程国家重点实验室的使命和责任,实验室已经和正在加快研究攻关,今后我们将陆续把相关重要研究成果整理成书,奉献给广大读者。



2016 年 1 月

序

地质导向钻井与随钻测井技术已经成为我国陆上油田、海上油田勘探与开发的重要手段,特别是对于页岩气、煤层气等非常规能源,复杂油气藏的高效勘探与开发必须采用导向钻井和随钻测井技术。导向钻井是智能钻井的核心组成部分,通过导向钻井可大大提高大斜度井、丛式井、水平井等高难度井的钻遇率,增大泄油面积;通过随钻测量和随钻测井,技术人员可以实时掌握钻头位置,调整钻井姿态,控制井眼轨迹,进行实时地层评价。由电缆测井转向随钻测井,既节省了作业用时,又解决了大斜度井测井仪器的传输问题,实时的随钻数据传输为地质专家、测井专家进行实时地层评价提供了技术保障。

早在 1997 年,中油测井公司就引进了 Halliburton 公司的 PathFinder 导向钻井系统,但是由于仪器本身的缺陷和技术人员的缺乏,该仪器并未起到实质性作用,也没有得到很好地应用与推广。自 2000 年开始,我国先后有胜利油田、大港油田和塔里木油田等开始引进并使用导向钻井和随钻测井技术,并逐渐得到大面积推广和使用。随着技术的提高,随钻地质导向成功率也大大提高,特别是近些年,随钻地质导向已经成为水平井、页岩气井钻井与开发的必然选择。没有导向钻井和随钻测井技术,页岩气的开发几乎是不可能的。但是迄今为止,国内还没有一本能够系统讲述导向钻井、随钻测量和随钻测井技术等方面的专业书籍。该书的编写急现场之所需,为钻井工程师、录井工程师和测井工程师等相关技术人员提供了一本系统完整的技术指导书。

该书主要讲述地质导向钻井、旋转导向钻井、随钻测量技术、随钻电阻率测井、随钻声波测井、随钻放射性测井、随钻核磁共振测井、随钻地层压力测试以及随钻地震等内容。书中内容丰富,涵盖 21 世纪以来国外石油公司的先进钻井测井技术。该书作者综合大量国内外文献,并结合其多年教学和现场科研成果,介绍了 Schlumberger 公司、Halliburton 公司及 Baker Hughes 等大型国际石油公司地质导向和随钻测井技术的发展历程、各类仪器的结构性能,并通过丰富的油田实例讲述了各关键技术的现场实施过程,非常容易被现场工程师所接受和应用。

希望该书的出版能够推动我国地质导向和随钻测井技术进一步向前发展。

陈 平

2016 年 5 月

前 言

智能钻井和随钻储层精细评价是石油勘探与开发技术发展的必然趋势,也是高效开发复杂油气藏的必然选择,始于 20 世纪 80 年代中后期的地质导向与随钻测井技术正是在这种形势下应运而生的。经过二十多年的研发,以 Schlumberger、Halliburton 和 Baker Hughes 等国际石油服务公司为代表的国际大公司已经将地质导向与随钻测井技术应用于世界各地油田的勘探与开发中,并取得了令业界瞩目的成绩。进入 21 世纪以来,国内各油田和专业公司也积极跟进,集中优势力量研发这一高端技术。

我从 2004 年开始接触地质导向和随钻测井技术的相关文献和资料,当时所知甚少,文献和资料也非常零散,在西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室做博士后研究期间,完成了《随钻电阻率时域有限差分数值模拟研究》报告,当时非常渴望能得到一本关于这方面的书籍。一方面,由于国内这方面技术几乎处于空白状态,加之很多文献都是英文,学习难度大;另一方面,地质导向和随钻测井技术所涉及的纯理论并不多,而是一门应用性很强的现场技术,对于科研和教学人员,要想真正理解和掌握它,则需要进行大量的现场应用。所以,至今还没有一本系统讲述地质导向与随钻测井技术的专业书籍,这也正是作者动笔编写本书的初因。但在编写过程中,由于内容跨越数个学科,资料庞杂,加之学识有限,唯恐挂一漏万,反而起误导作用,因此曾几次搁浅。近年来,随着中国经济的快速发展和对能源的迫切需求,复杂油气藏的勘探与开发成为各油田的主战场,特别是对于页岩气的钻探和开发,水平井和大斜度井作业已成为必然选择,越来越多的油田优先采用地质导向和随钻测井技术,以提高钻井中靶率和油田开发的经济效益。这又促使作者想要尽快完成这样一本书籍的编写工作。

本书的另一位作者——西南石油大学夏宏泉教授,在国内较早地开展了随钻测井技术的教学和科研工作,参与了国内四川油气田、塔里木油田、长庆油田以及中海油等多个油田地质导向和随钻测井科研项目,还参与完成了国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题“页岩气水平井钻完井关键基础研究”(编号:2013CB228003)、国家重大专项“页岩气水平井井眼轨迹优化设计与地质导向理论研究”等。他在随钻测井和随钻地层压力测试方面有着丰富的经验。

本书共有 8 章,主要包括以下三方面的内容:①讲述旋转导向和地质导向钻井技术的发展概况与现场应用,简要介绍随钻测量过程中信号传输的关键技术;②详细讲述随钻电法测井、随钻声波测井、随钻地震以及随钻放射性和随钻核磁共振测井技术的产生、发展和基本原理,并通过大量现场实例介绍各种随钻测井技术的现场应用效果(本书的重点内容为第 5 章、第 6 章和第 7 章);③介绍随钻地层压力测量仪器的结构、性能以及在油田勘探和开发阶段的应用。

本书第 3 章、第 6 章、第 8 章由西南石油大学夏宏泉教授和川庆钻探公司测井发展中心吴宝玉高级工程师编写,其余各章由刘红岐完成,全书由刘红岐统稿定稿。

西南石油大学陈平教授认真阅读了书稿,提出了许多宝贵的修改意见,并为本书作序,在此表示感谢。此外,在本书的编写过程中,研究生周广照、田杰、刘江涛、张斌、雍杰、赵毅、薛辉等为本书绘制和编辑了大量的图件和表格,对以上同学表示衷心感谢。

还要感谢出版社罗莉女士以及其他工作人员为本书的出版所付出的辛勤工作。

由于作者的知识水平有限,书中难免存在纰漏与错误,真心希望广大读者提出批评与指正,使本书更加完善,真正起到指导现场作业和教学科研的作用。

刘红岐

2016年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 随钻测量技术	4
2.1 随钻测量技术概况	4
2.2 随钻测量技术的组成	5
2.3 随钻测量信号传输	6
2.4 随钻测量工具的耐温耐压性能	8
2.5 随钻测量技术的应用	8
第 3 章 旋转导向与地质导向	28
3.1 导向钻井技术概述	28
3.2 旋转导向技术	32
3.3 地质导向技术	42
3.4 地质导向的实现方法	45
第 4 章 随钻测井与数据传输技术概况	58
4.1 Schlumberger 公司随钻测井技术	58
4.2 Halliburton 随钻测井技术	68
4.3 Baker Hughes 公司随钻测井技术	73
4.4 WeatherFord 公司随钻测井技术	81
4.5 随钻数据传输技术	85
第 5 章 随钻电法测井	91
5.1 随钻电阻率测井仪简介	93
5.2 Schlumberger 公司的随钻电阻率测井仪	97
5.3 随钻电阻率影响因素讨论	105
5.4 随钻电阻率测井的应用	121
第 6 章 随钻声波与随钻地震	134
6.1 随钻声波测井研究进展	134
6.2 随钻过程中的震动与噪声	135
6.3 随钻过程中纵横波的测量	138
6.4 APX 与 CLSS 仪器的结构组成与主要性能	140
6.5 随钻声波仪器工作原理	145
6.6 sonicVision 随钻声波仪器	148
6.7 随钻地震	157
第 7 章 随钻放射性测井	177
7.1 随钻自然伽马测井	177

7.2	随钻中子密度测井.....	180
7.3	EcoScope 多功能随钻测井.....	185
7.4	随钻核磁共振测井.....	200
7.5	随钻核磁的应用与现场实例	206
第 8 章	随钻地层压力测试.....	209
8.1	随钻地层压力测试技术概况	209
8.2	随钻地层压力测试的应用	215
参考文献		223

第1章 绪 论

1. 国外随钻测井技术的发展现状

自 1930 年起,人们就开始对随钻测量进行尝试,并曾将传输电缆嵌入钻杆内进行随钻电阻率的测量。1940~1960 年,人们先后采用电磁波、声波等信号作为井下测量信号的载体,后来科研人员利用在钻井液柱中产生压力脉冲的方法来传输测量信息。1978 年,TELECO 公司开发出第一套商业化的 MWD 系统——TELECO 定向随钻测量系统。1980 年,钻井液脉冲传输随钻测井系统诞生,这种传输技术首先应用于随钻电阻率的测量,而后应用于随钻中子测井和随钻密度测井等方面。

随钻技术发展至今,大致可分为三代。1990 年以前的相关技术属于第一代。此期间的随钻技术以 Schlumberger 下属子公司 (Anadrill 公司) 推出的 MST 多传感器 MWD 系统为标志,主要以钻井工程参数的随钻测量和 2MHz 电阻率测量为主,测量参数单一,数据传输速率低。

1990~1996 年的相关技术属于第二代。其代表性的仪器有:1991 年, NL Sperry 公司推出的 EPR phase4 型多探测深度的方位电阻率测量并眼成像技术——近钻头倾角仪。它通过导向马达、正演模拟程序,以及地质导向来实现准确钻进;1992 年, Anadrill 公司首次推出综合钻井评价和测井软件包,并引入了近钻头电阻率仪和声波井径仪;1994 年, Baker Hughes 公司推出小井眼的 NaviTrak 定向/自然伽马井下仪器,以及第一套 NaviTrak 短曲率随钻测量系统和 NaviGator 储层导向系统;1995 年是随钻测井仪器 (小井眼电阻率仪器) 的快速发展期, Sperry Sun 公司推出了 Slim Phase4 内存型 $4\frac{3}{4}$ in 仪器, Anadrill 公司研制出了 arc-5 仪器, Baker Hughes 公司推出了 NaviMPR IDS 仪器。

1997 年至今的相关技术属于第三代。这期间, Schlumberger 公司推出的随钻测井仪器有 Vision 和 Scope LWD 系列, Baker Hughes 公司推出了 OnTrak LWD 平台等。这些仪器在测量参数范围、数据传输效率、随钻成像等多个方面都有了质的飞跃,可实时提供确定地质环境、钻井过程、采集实时信息时所需要的数据。

2000 年以来,随钻测井仪器的研制向着随钻核磁共振、随钻地震、随钻声波成像、随钻电阻率成像方面发展,并取得了显著的成绩,与已有的随钻测井仪器相比,在地层的探测深度和准确性方面都有提高。这些仪器可用于测量高分辨率电阻率、声波、并眼成像、地层倾角、环空压力、泄漏,以及进行地层综合测试等。Schlumberger 公司的 Vision 系列代表着最新一代的 LWD 测井技术,包括感应型或电磁波传播测井、方位密度中子测井以及自然伽马测井等项目。Vision 系列包括电磁波传播电阻率、方位电阻率和方位密度中子测井 (AdnVision) 等仪器,并扩大了井下存储器容量,所有数字式电子线路可提供更精确可靠的测量结果,质量上可与快速平台系统相媲美。实时随钻环空压力 APWD 测量仪器改进了钻井导向性能,提高了钻井效率,保证了钻井安全。在所有的泥浆条件

下，Vision 系列可以获得全井眼图像，并可用于构造解释、地质导向、地层评价和井眼故障分析（布志虹等，2001；邹德江等，2005）。

第三代随钻测井仪器的主要技术特征为：仪器种类更多，体积更小，数据传输更快，信息量更大，可靠性更高，地面解释软件功能更强等。测斜时间为 90~130s，工具面更新时间为 9~18s，钻挺直径为 3¹/₈~9¹/₂in；井下仪器平均无故障时间为纯定向时 300h 以上和随钻测井时 200h 以上。国外相关公司最新随钻测井仪器的相关情况见表 1-1。

表 1-1 几种主要的随钻测井仪器

公司名称	随钻测井仪器
Schlumberger	自然伽马、电阻率（补偿双电阻率、近钻头电阻率、阵列电阻率）、补偿中子密度、方位密度、随钻声波、核磁共振成像、随钻地震、超声波井径
Halliburton	自然伽马、电阻率（补偿双电阻率）、自然伽马能谱、岩性密度、补偿热中子、方位密度、核磁共振成像、超声波井径、井底压力测试、钻柱动力学测量
Baker Hughes	方位自然伽马、多频电磁波电阻率、补偿方位中子密度、随钻声波、超声波井径

2. 国内随钻测井技术的发展现状

我国在“六五”与“七五”期间曾组织过“电缆式定向随钻测井系统”（航天部 33 所与石油勘探开发研究院）、“随钻井下记录系统”（石油勘探开发研究院）以及“随钻测量电磁波传输信道可行性研究”（机电部 22 所与石油勘探开发研究院）等项目，但都未取得可以应用的成果。1996 年，在中国石油天然气集团公司的大力支持下，中油北京录井公司引进了我国第一套 PathFind LWD 和 Slim GR MWD 设备。1999 年年初，胜利油田从美国引进了一套较先进的带地质导向参数的随钻地层评价无线随钻测量仪。2001 年，国内学者开始进行 MWD/LWD 国产化研究工作，成功地研制出了具有自主知识产权的新型正脉冲随钻测量仪、随钻自然伽马和随钻感应电阻率测量仪。2004 年，石油勘探开发研究院钻井所与海洋石油研究中心大力合作，研制出近钻头随钻工程及地质参数测量系统部分样机。目前，胜利油田地质导向钻井技术在国内具有领先水平。2005 年，由胜利钻井院负责的随钻电阻率测井仪器研制成功，井下井试验成功，这标志着我国随钻测井技术又向前迈进了一步。“十二五”期间，中油测井公司投入了较大的研究资金，成立了专业研究团队，成功研发了国内目前最齐全的随钻测量和随钻测井仪器系列。

到 2010 年，国内各油田引进的随钻仪器主要有 Schlumberger 公司的 PowerDriver、Baker Hughes 公司的 OnTrak、Halliburton 公司的 Sperry Sun MWD，以及胜利伟业公司生产的 SLD6000 国产随钻测井系统等。我国共引进 Halliburton 公司的 FEWD 系列 22 套，Sperry 公司的 Sun 系列 49 套，Baker Hughes 公司的 OnTrak 系列 5 套、NaviTrak 系列 28 套。

3. 随钻技术的优势

随钻技术可以分为三大部分，即随钻导向钻井技术、随钻测量技术和随钻测井技术。

地质导向可提供精确的眼轨迹测量,以达到对井身的实时控制,使钻头长上“眼睛”,可实时地“看”到井下正在发生的情况,所以可以改善决策过程,及时调整钻头在油层中的穿行位置,提高钻井成功率,降低钻井风险,并具有随钻辨识油气层、随钻导向功能强的特点,能直接服务于地质勘探,可提高探井发现率和成功率,更适合于复杂地层、薄油层钻进的开发井,同时可提高油层钻遇率和采收率。

随钻测量是指在钻头附近测得某些信息,不需中断正常钻进而将信息传送到地面的过程。随钻测量的主要作用是定向井服务,测量的信息有:①定向数据,包括井斜角、方位角、工具面角等;②钻井工艺参数,包括钻头处的钻压、扭矩、钻柱转速、环空温度、环空压力等;③地层伽马、电阻率参数。以上参数通过由若干种传感器组成独立的参数短节,在 MWD 或 LWD 上实现随钻测量。

随钻测井包括随钻井径、自然伽马、电阻率、声波、密度、中子、光电吸收截面、电阻率成像、核磁共振成像、随钻地震等技术,基本上已经涵盖了目前电缆测井的所有技术。

随钻测井技术的发展与完善,使其成为电缆测井的一个重要补充手段。由于是在钻井的同时进行参数测量,使得在地层钻井液刚刚侵入或几乎没有侵入污染前就能获得真实的地层特性和最新资料,这对正确评价地层是重要和必要的,因此随钻测井的优势体现在以下方面。

(1) 不需要电缆,可测全常规测井项目,随钻测井在钻井的同时完成测井作业,减少了占用井场钻机的时间,并从钻井-测井一体化服务的整体上节省成本。

(2) 对于放射性测井来讲,由于测速慢,降低了放射性测井的统计误差,提高了仪器的纵向分辨率。

(3) 对于电阻率测井来讲,随钻测井资料是在泥浆滤液侵入地层之前或侵入很浅时测得的,更真实地反映了原状地层的地质特征,可提高地层评价的准确性。

(4) 利用随钻伽马和随钻电阻率测井识别易发生复杂情况的地层,可以实时发现薄的气层。

(5) 在钻井时,利用伽马射线和电阻率测井可以评价地层压力,并与邻井进行对比。

(6) 在某些大斜度井或特殊地质环境(如膨胀黏土或高压地层)中钻井时,电缆测井十分困难或风险较大以致于不能进行作业,随钻测井是唯一可用的测井技术。

随钻测井技术把随钻测井工程师与现场的钻井工程师和地质专家结合起来,提供高水平的储层区评估/开采服务,这将使井位设计和勘探开发的目的更加准确。国内各大油田对随钻测井技术的使用经过了引进、消化、吸收和创新四个阶段。

随着各类复杂油气藏、致密油气藏、页岩气藏等非常规油气藏不断被发现,大位移井、水平井、各类复杂井越来越多,常规的电缆测井已经无法进行作业,随钻测井将成为各大油田公司的必然选择。随钻测量和随钻测井技术的应用前景十分广阔。

第2章 随钻测量技术

随钻测量（measurement while drilling, MWD）系统是指在钻井过程中进行井下信息实时测量和上传的技术。其测量信息包括井斜、井斜方位、井下扭矩、钻头承重、自然伽马、电阻率等参数。随钻测井（logging while drilling, LWD）系统是指在钻井过程中，完成自然伽马、地层侧向电阻率、感应电阻率、声波、密度、中子、光电指数等参数的测量的技术。

2.1 随钻测量技术概况

1980 年，Schlumberger 公司推出了业界第一支 MWD 工具——M1，它能够提供井斜方位和工具面测量功能，标志着定向钻井进入快速发展的时代。1993 年，Schlumberger 公司推出了高速钻井液脉冲 MWD 工具——PowerPulse（俗称 M10），该工具能够获得稳定的钻井液传输信号，实现高速传输，传输速率最高可达 16bit/s，相比上几代工具，其最大的特点是“可靠性更高、维护费用更低和传输速率更快”，同时还具有“长度更短、防磨性更强、工作频率可调、抗振性更好、排量范围更广和上限排量更高”等诸多优势。2000 年，Schlumberger 公司推出了满足小井眼定向井需求的工具，即 ImPulse，它同时具有 MWD 和 LWD 功能，其工具设计确保能够与其他小井眼随钻测井工具和旋转导向工具配合使用，这使得 Schlumberger 公司在小井眼定向钻井和测量技术领域处于领先的地位。

进入 21 世纪以来，定向钻井对随钻测量技术的要求越来越高，如图 2-1 所示。三十

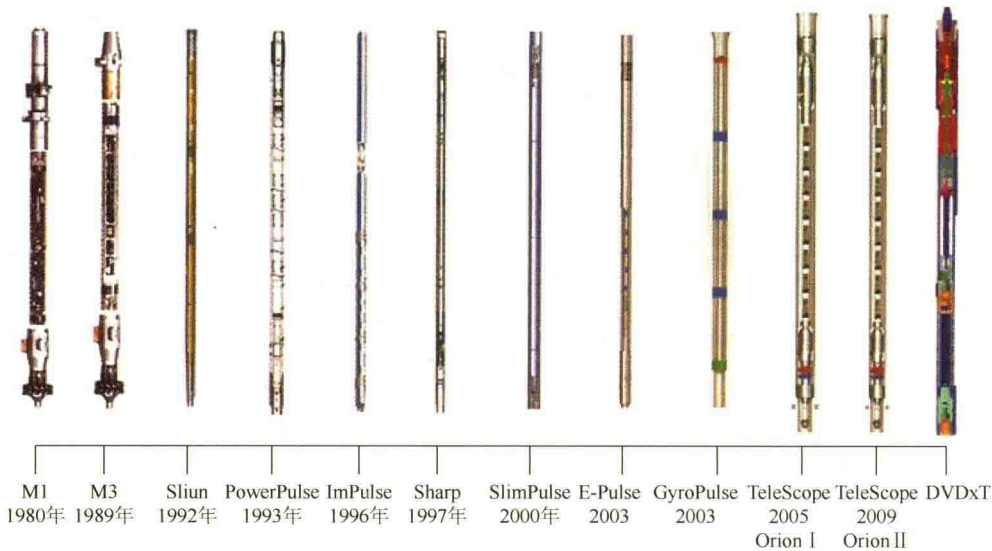


图 2-1 随钻测量技术的发展

（吴奇等，2012）

多年来, Schlumberger 公司通过工程技术研究及现场的实际应用经验积累, 先后研发并推出了传输速率最快、性能最可靠的 MWD 工具系列。特别是在 2005 年, 该公司推出了基于 Orion I 的最新一代 MWD 工具——TeleScope, 2009 年, 推出了基于 Orion II 的 TeleScope 仪器, 它在 PowerPulse 技术的基础上, 采用 110W 三源供电板电源替代 PowerPulse 工具的 LTB 电源, 采用带 2M 内存的双核处理器芯片替代原来 PowerPulse 工具的控制板。

2.2 随钻测量技术的组成

随钻测量技术主要包括地面系统和井下系统。其地面系统主要包括地面钻井参数测量(深度跟踪)、地面传感器(接收井下 MWD 工具发出的信号)、地面计算机(解码和处理数据)三部分。井下系统主要包括供电、井下测量、井下信号的发生、井下数据遥测传输四部分。

(1) 供电部分。该部分主要有电池电源或井下替代电源(涡轮发电), 为井下工具串提供电力。其中, 电池可以在停泵状态下提供电力, 但是其作业时间电力输出有限(可能会限制使用某些大功率及耗电量较大的测量项目)。采用涡轮发电等替代电源则需要开泵, 并且保证在不同排量下均能提供电力。

(2) 井下测量部分。该部分主要是对井眼轨迹形态和井下钻具基本状态进行测量, 包括井斜、方位、工具面角等(图 2-2), 其主要目的是为定向钻井专家提供基本参数来控制 and 调整井眼轨迹。同时, MWD 工具通过加装测量短节, 还可以实现其他可选参数的测量, 如自然伽马、井下钻头钻压、井下钻头扭矩、环空温度和环空压力等。

(3) 井下信号的发生部分。该部分主要通过转子和定子之间过流通道的闭合和开启产生压力脉冲波作为信号传输载体, 实现数据传输。

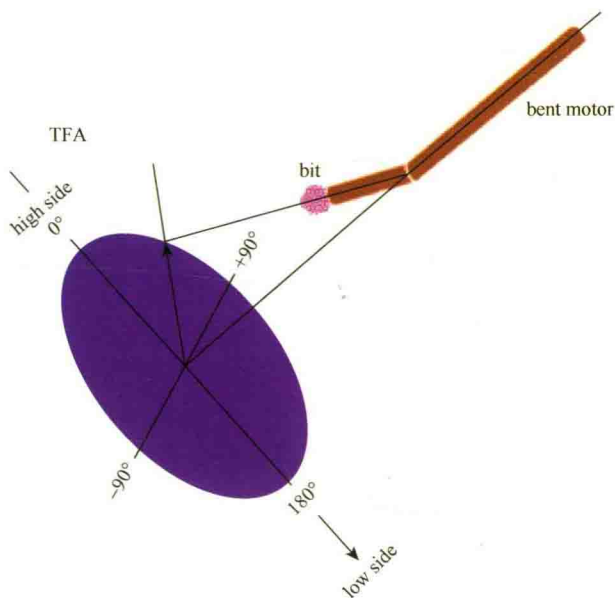


图 2-2 工具面角

high side: 高边; low side: 低边; TFA: 总流量面积; bit: 钻头; bent motor: 弯壳体马达

(4) 井下数据遥测传输部分。该部分主要是将模拟信号转换成数字信号，再将这些数字信号转换成压力脉冲波，通过钻井液传输到地面。

这四个部分的功能紧密配合，在随钻过程中为定向井实时提供井下信息。钻井工程师和定向井工程师依据这些信息可以及时调整钻井参数，规避钻井风险，安全高效地实现定向井的钻井目标。

2.3 随钻测量信号传输

2.3.1 随钻测量信号的传输速率

MWD 工具一项重要的功能就是实现数据的实时传输，即将井下仪器测量到的部分或全部信息实时传输到地面车载工作站。该功能也是评定随钻测量工具性能优劣最为关键的一项指标，其定量指标是单位时间传输数据的字节数，即 bit/s。

通常，传输速率为 3bit/s 时，就可以满足伽马、电阻率、中子、密度等常规三组合曲线的实时传输要求。对于传输成像资料或边界探测等数据量相对较大的测量项目，则采用 6bit/s 甚至更高的传输速率。表 2-1 列出了 Schlumberger 公司常见的 MWD 工具的数据传输速率，应根据不同的实时传输需求选择适当的 MWD 工具。

表 2-1 不同速率 MWD 工具的数据传输速率

MWD 工具名称	数据传输速率/ (bit/s)
TeleScope	0.5~120 (通常为 12)
PowerPulse	0.5~16 (通常为 6)
ImPulse	0.5~12 (通常为 6)
SlimPulse	0.75

2.3.2 随钻测量过程中的速度匹配

MWD 工具最重要的目标之一就是使地面实时获取井下测量数据，这一目标的实现受测井测量速度、机械钻速和随钻测量工具数据传输速率的影响。目前测井测量速度远远高于机械钻速和实时传输速度，不会影响地面实时数据的获取。这样，在确保机械钻速和数据实时传输速度匹配后，就可以很好地获取实时数据，因此，MWD 工具的实时传输速率对定向钻井的意义非常明显：低传输速率会限制机械钻速，只有在降低机械钻速的情况下才能在地面获得必要的实时数据；高传输速率可以避免测量对机械钻速的约束，也可以在任何自然钻速下实时提供更多的定向、测井、测量数据。如图 2-3 所示，将 Schlumberger 公司新一代随钻测量工具 TeleScope 与目前行业中常用的 MWD 速率进行简单对比，可以看到，在机械钻速相同的条件下，TeleScope 可以实时传输 25 条随钻曲线，而通常 MWD 仅能实时传输 6 条随钻曲线。如果在相同数据量（以 6 条曲线为例）、使用常规 3bit/s 传输速率的情况下，机械钻速最高不能超过 100ft/h，而 TeleScope 的传输速率为 12bit/s 时，

机械钻速最高可达到 450ft/h。

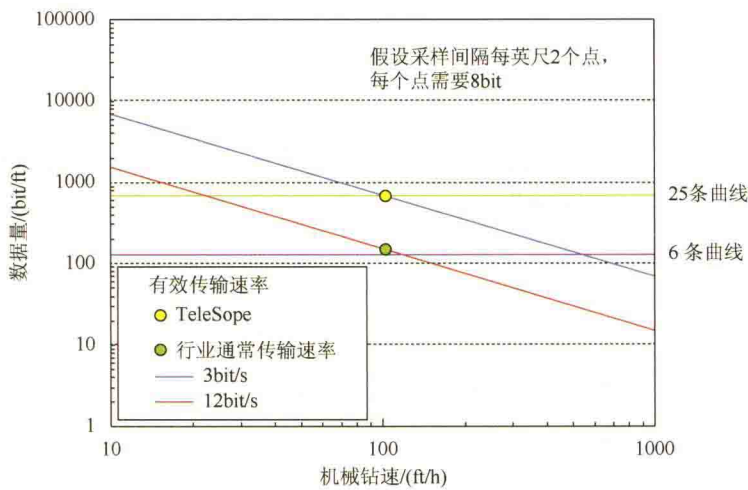


图 2-3 MWD 与 TeleScope 传输速率的差异对比
(吴奇等，2012)

2.3.3 随钻测量工具的主要特点

下面以 TeleScope 的基本特征为例来简单说明 Schlumberger 公司新一代 MWD 工具的基本特点。

TeleScope 基本的测量项目如表 2-2 所示。

TeleScope 的硬件遥测性能和供电特点如表 2-3 所示，由于 TeleScope 采用了 Orion 技术，在上述硬件遥测性能的基础上，可以进一步提升实时传输速率。Orion 技术主要体现在以下四个方面：①DSPT 技术，即在信号源处直接数字化信号，排除了电噪声的影响；②HSPM 技术，采用了改进的分级接收技术、新的贝叶斯接收技术及宽频去噪技术；③连续波调制技术（8PSK），有望直接实现 18bit/s 的硬件遥测速率；④高效数据压缩技术。

表 2-2 TeleScope 的测量项目

测斜	诊断性测量	可选项测量	其他测量
方位、井斜、旋转状态下方位、旋转状态下井斜、磁工具面、重力工具面	MWD 状态字、油量警告、涡轮转速、LWD 状态字、LTB 重试状态字	自然伽马、周向、径向、轴向振动，井下钻头钻压和钻头扭矩	井下温度、标准横向振动和冲击

表 2-3 TeleScope 的硬件遥测性能及供电特点

参数	TeleScope 规范	单位
遥测类型	连续波（QPSK/CPMSK）	—
遥测速率	0.5、0.75、0.8、1.0、1.5、1.6、2、3、3.2、6、6.4、8、12、16	bit/s
供电类型（寿命时间）	涡轮发电（没有时间限制）	h