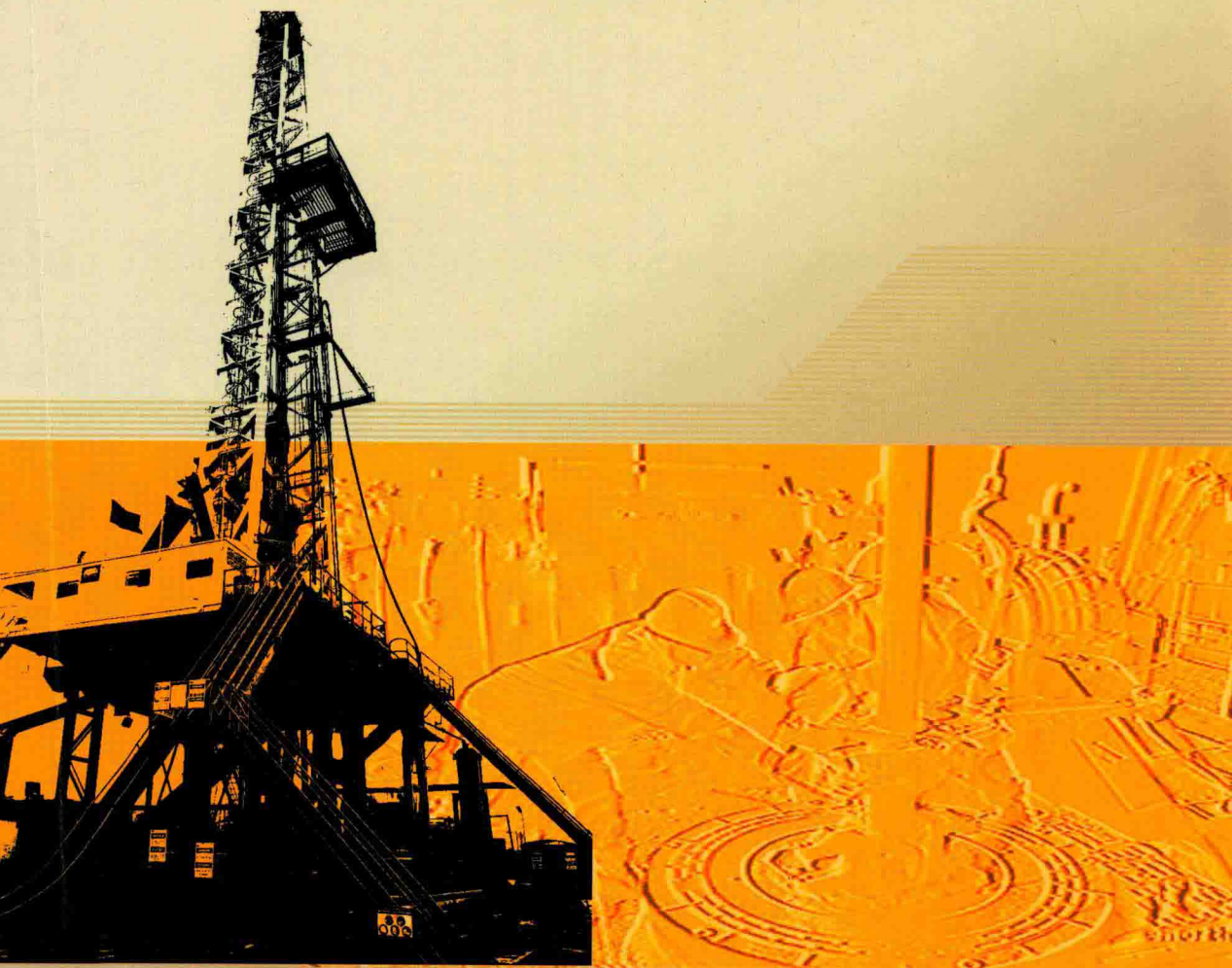


2012年石油井基础理论与 前沿技术开发新进展 学术研讨会论文集

苏义脑 主编



石油工业出版社

2012 年钻井基础理论与前沿 技术开发新进展学术研讨会论文集

苏义脑 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为 2012 年钻井基础理论与前沿技术开发的新进展学术研讨会的论文集, 主要包括钻井技术发展与管理研究、钻井工艺技术、钻井液技术、固井技术、钻井完井装备与工具等, 反映了我国钻井领域最近几年的最新研究成果及研究方向。

本书可供从事油气钻井技术研究和应用的技术人员、管理人员和高校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

2012 年钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会论文集 / 苏义脑主编.
北京: 石油工业出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5021-9791-9

I .2…

II . 苏…

III . 油气钻井 - 学术会议 - 文集

IV . TE2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 222537 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523562 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 38

字数: 970 千字

定价: 150.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《2012 年钻井基础理论与前沿技术开发
新进展学术研讨会论文集》
编 委 会

主 编：苏义脑

副主编：周英操 盛利民 闫 铁

编 委：(按姓氏笔画排序)

邓金根 吕光明 孙金声 孙晓峰 朱忠喜 毕雪亮
余金海 李 玮 李士斌 李根生 周 静 孟英峰
郑双进 夏宏南 徐依吉 徐鸣雨 蒋宏伟 蒲晓林
谭文礼

学术研讨会主办单位：

油气钻井技术国家工程实验室

中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室

中国石油天然气集团公司钻井工程技术试验基地

中国石油学会工程专业委员会钻井工作部钻井基础理论学组

2012 年钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会

开 幕 词

(代前言)

尊敬的各位领导，各位专家，各位代表：

大家好！

时值初秋，在我国石油工业的圣地——大庆，“2012 年钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会”今天开幕了。本次会议由油气钻井技术国家工程实验室、中国石油天然气集团公司（CNPC）钻井工程重点实验室、中国石油天然气集团公司钻井工程技术试验基地和中国石油学会工程专业委员会钻井工作部钻井基础理论学组联合主办。我谨代表上述四个主办单位和组织，向与会的各位领导、各位专家和代表，表示热烈的欢迎和衷心的感谢！

参加本次会议的有来自中国石油、中国石化、中国海油等三大集团公司，石油高等院校的领导和专家共计 111 人，包括油气钻井技术国家工程实验室学术委员会委员、钻井基础理论学组成员、钻井工程技术试验基地和钻井工程重点实验室学术委员会委员、相关单位代表、研究人员和入选论文的作者。此次会议得到了有关领导部门、依托单位和著名专家的大力支持。中国石油天然气集团公司科技发展部、中国石油集团钻井工程技术研究院、东北石油大学有关领导同志也在百忙之中莅临会议并将作重要讲话。本次会议特别邀请了几位院士和业内专家，将就大家所关心的技术热点和钻井技术发展的未来走向做专题学术报告。石油工业出版社和中国石油报的专家、记者也莅临会议，进行指导和报道。让我们再次以热烈的掌声向他们表示感谢！

本次会议是第 6 届“钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会”，也是 CNPC 钻井工程重点实验室自 2000 年成立以来的第 6 次全国学术大会，是钻井基础理论学组自 1991 年成立以来的第 10 次学术会议，是油气钻井技术国家工程实验室自 2008 年成立以来的第 2 次学术大会，同时也是中国石油天然气集团公司钻井工程技术试验基地挂牌运行以来的第 1 次学术大会。“钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会”，是我国油气钻井科技工作者进行学术交流的盛会，是联系三大石油集团和石油高校钻井专家的纽带，体现了产学研的紧密结合，体现了基础理论研究、前沿技术开发和现场应用的紧密结合，对我国油气钻井技术的发展起到了一定的推动作用。目前这个会议已形成品牌和制度，每两年举办一次，由石油工业出版社出版会议论文集，已经形成系列。在此我提议，让我们以热烈的掌声对石油工业出版社给予的大力支持表示感谢！

各位代表！我们这次会议是在一个新的形势和战略时机下召开的，有几点值得我们高度关注：其一是当前全国各行各业都在以扎扎实实的工作迎接十八大的召开；其二是胡锦涛总书记在今年 6 月的两院院士大会和 7 月的全国科技创新大会上发表了重要讲话，强调

“创新驱动发展”，提出“坚持把科技摆在优先发展的战略位置，把科技创新作为经济发展的内生动力”，对我国的科技创新和新型国家建设进一步指明了方向；其三是目前正处于国家准备大力开发页岩气的关键时刻，我们油气钻井科技工作者正面临着重大的机遇和挑战。

本次会议还专门安排参观大庆石油博物馆。大庆油田是我国工业战线的一面旗帜，是铁人精神的发源地，是爱国主义的教育基地。在这里，我们将会近距离感受到中国石油奠基者的胸怀和艰辛，感受到中国油气钻井技术的发展历程，感受到大庆人求真务实的科学精神，感受到要把我国从当前的钻井大国变成未来的钻井强国所应肩负的历史重任，从而进一步激发我们科技创新、攻坚克难的斗志和信心。

各位代表！加强基础研究，突出技术创新，瞄准前沿进展，做好战略储备，是一项必须常抓不懈、孜孜以求的工作。在座的各位都是从事钻井基础理论研究、前沿技术开发和科研管理工作的精英，发展我国钻井基础研究与前沿技术的重任，责无旁贷地落在各位代表的肩上。让我们汇聚一堂，交流成果与心得，共商发展，谋求创新，加大原创，为推动我国钻井基础理论和前沿技术的进展而出谋划策。

本次会议由中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室所属的三个研究室即钻井高效破岩技术研究室（东北石油大学）、固井技术研究室（中国石油海洋工程有限公司）和防漏堵漏技术研究室（长江大学）具体承办，并由东北石油大学的“提高油气采收率教育部重点实验室”协办。在一年多的筹备过程中，得到了中国石油集团钻井工程技术研究院和东北石油大学领导的大力支持。在此，我代表会议的四个主办单位向他们表示由衷的谢意！

预祝本次会议取得圆满成功！

谢谢大家！

苏义脑

2012-8-27，大庆

目 录

第一部分 钻井技术发展 with 规划研究

石油天然气钻井工程科学技术发展规律探讨·····	苏义脑	周煜辉	(3)
关于油气钻井工程技术制高点和战略性新兴产业的思考·····	苏义脑	周煜辉	(10)

第二部分 钻井工艺技术

塔里木碳酸盐岩复杂地层精细控压钻井技术研究·····	石 林	杨雄文	周英操等	(19)
超临界 CO ₂ 强化页岩气开发技术分析 ·····	王瑞和	霍洪俊	倪红坚	(26)
超临界 CO ₂ 射流破岩钻井基础研究 ·····	王瑞和	杜玉昆	倪红坚	(33)
精细控压钻井技术在南堡潜山裂缝性油气藏中的应用研究 ·····	孙海芳	李祥银	韩烈祥等	(40)
精细控压钻井系统控制策略设计及实践·····	李枝林	薛秋来	唐国军等	(46)
水平井井壁稳定性理论分析·····			陈朝伟	(52)
南堡 128 井欠平衡钻井井壁稳定性研究·····	刘厚彬	朱宽亮	孟英峰等	(56)
硬脆性泥页岩坍塌机理及对策研究·····	王建华	刘进京	徐显广等	(63)
液相欠平衡钻井气层钻进井筒流动规律研究·····	朱忠喜	夏宏南	王朝飞等	(73)
液相欠平衡钻井起钻抽汲单股气侵井筒瞬态流动·····	魏 纳	孟英峰	李 皋等	(79)
一维弱压缩性流体与弹性管道的三维耦合系统动力学建模和数值求解·····			洪迪峰	(87)
超临界 CO ₂ 水平井携岩规律数值模拟研究 ·····	倪红坚	霍洪俊	杜玉昆等	(94)
岩屑床清洁工具作用的环空流动特性数值模拟·····	孙晓峰	闫 铁	王克林等	(101)
裂缝性漏层漏失流阻分析模型及封堵措施探讨·····	李 进	李早元	郭小阳	(108)
深水泥线以上测试管柱动力学特性研究·····	何玉发	姜 伟	蒋世全等	(118)
考虑裂纹水平井钻柱疲劳寿命预测·····	王 鹏	闫 铁	毕雪亮等	(130)
油气井钻具损坏原因分析及预防技术措施·····		姜智博	刘 伟	(137)
考虑水平段动态压漏的水平井井身结构设计·····	郑双进	黄志强	吴红建	(147)
水驱砂岩油藏后期加密井井眼轨道防碰技术研究·····	王长江	陈 海	王中应等	(151)
基于膨润土浆基液的雾化钻井技术研究与应 用·····	肖 洲	邓 虎	余 锐等	(157)
同心管注气钻井工艺参数优化研究·····	窦亮彬	李根生	沈忠厚等	(160)
大庆油田薄油层鱼骨井井眼轨迹优化及应 用·····	朱健军	李 杉	郭光辉	(169)
苏里格气田首口分支水平井钻完井技术·····	程元林	韦海防	李欣等	(175)
苏里格小井眼钻井技术·····		郭晓明	李登前	(181)
水力喷射酸压技术在塔里木油田水平井中的应 用·····	范 鑫	李根生	黄中伟等	(188)
充气欠平衡钻井技术在准噶尔盆地的应 用·····	杨明合	夏宏南	杨 虎等	(195)
渤海湾盆地牛东潜山构造深层气体钻井试 验·····	李永杰	孟英峰	李 皋	(201)
页岩气和煤层气井水力脉冲空化射流钻井现场试 验·····	付加胜	李根生	史怀忠等	(210)

适用于页岩气开发的液化氮气气化压裂技术·····	李子丰	徐红芳	(216)
模糊封堵在煤层气钻井中的应用·····	郑力会	张志珩	宫明欣 (222)
分支井技术在煤层气开发中的应用·····		张 雪	(228)
粒子钻井技术新进展与破岩数值模拟研究·····	赵 健	徐依吉	段 鹏 (232)
注水井浅层高压区预测与控制·····	任 伟	李士斌	张立刚 (244)
钻井工程设计与工艺软件的发展现状及趋势·····	蒋宏伟	周英操	张冬梅等 (250)
数据仓库技术在钻井工程中的应用·····	张冬梅	赵 庆	连志龙等 (256)
热采井套管柱力学分析与软件开发·····	刘书杰	黄志强	谢仁军等 (263)
两类深层火山岩强度和变形特性试验研究·····	张立刚	闫 铁	李 玮 (268)
清水压裂适应储层室内评价方法·····	康智超	李士斌	衣治安等 (274)
超临界 CO ₂ 喷射破岩实验研究 ·····	王海柱	李根生	沈忠厚等 (280)

第三部分 钻井液技术

深水钻井液中水合物抑制剂实验研究·····	邱正松	赵 欣	江 琳等 (289)
油水兼容型发泡剂 Drfoam-2 的研究与应用 ·····	赖晓晴	苏义脑	熊开俊等 (296)
基于仿生技术的强抑制固壁型钻井液体系·····	宣 扬	蒋官澄	张 弘等 (304)
钻井液合理流变参数范围的确定方法与应用·····	姚如钢	蒋官澄	李 威等 (315)
改变岩石表面 ξ 电位提高破岩效率的机理研究 ·····		杨宇平	(322)
泥页岩孔隙孔道中的流体运移规律研究·····	邓元洲	陈 立	张 伟 (330)
抗高温气制油基钻井液用乳化剂的研制及其性能评价··	王茂功	徐显广	苑旭波等 (337)
耐温抗盐钻井液增黏剂的制备及其性能评价·····	闫丽丽	孙金声	李英敏等 (342)
微米级片状氧化锆的制备·····	杨东梁	曹晓春	李艳钰 (350)
长北气田大斜度井段钻井液技术的研究与应用·····	陈 磊	董海东	林 海等 (354)
一种合成基钻井液在四川页岩气水平井中的应用·····	王京光	杨 斌	张小平等 (361)
油基钻井液在页岩油气井开发中的研究与应用·····	吴 彬	王 荐	舒福昌等 (367)
一种化学固壁堵漏新方法·····		张汉林	(374)
复合凝胶堵漏技术在苏桥储气库承压堵漏中的应用·····	杨海军	冯 杰	杨 洪等 (379)

第四部分 固井技术

热采井预应力固井模块化地锚的设计·····	黄志强	张 强	刘书杰等 (387)
枯竭油气藏储气库固井技术研究进展·····	邹建龙	刘爱萍	吕光明等 (391)
浅层气地层提高固井质量技术探讨·····	寇洪彬	屈振国	李秋生 (398)
水泥浆失重研究及对比分析·····	朱海金	吕光明	刘爱萍等 (403)
高渗低压地层影响套管—水泥环界面胶结机理研究·····	杨秀天	王 欢	刘爱玲等 (409)
基于 MATLAB 对水泥浆多参数流变模式的回归研究 ···	李志宏	李 波	朱 哲等 (417)
石英砂粒径对热采井固井水泥石耐温性能的影响·····	王 岩	程小伟	郭小阳 (422)
新型低温早强剂 ZL-1 的性能评价·····		王继刚	徐卫强 (430)
海塔地区水泥浆体系的确定及其性能评价·····	王继刚	张哲明	赵文秀 (435)
提高调整井固井质量水泥浆体系评价实验研究·····	侯力伟	胡媛媛	(443)
室内模拟固井质量评价方法研究·····	张 立	王 欢	刘爱玲等 (448)

低水化热早强水泥浆室内研究..... 席方柱 吕光明 高永会等 (452)

第五部分 钻井完井装备与工具

世界海洋钻机技术发展现状..... 王灵碧 葛云华 杜 滨等 (461)

连续油管钻井工具及工艺概述..... 冯 来 王 雪 卢 静 (469)

基于交流电磁场的海洋平台结构损伤检测探头优化设计
..... 郑文培 苏义脑 方太安等 (473)

精细控压钻井系统的研制与应用..... 陈若铭 伊 明 杨 刚等 (479)

自动垂直钻井系统的研制及应用..... 艾才云 成检林 陈嘉陵等 (492)

旋转闭环系统导向参数求解方法..... 唐雪平 苏义脑 盛利民等 (497)

旋转导向钻井工具重力工具面的确定方法研究..... 李汉兴 蒋世全 傅鑫生 (504)

偏心位移式旋转导向钻井工具控制方法研究与试验..... 陈红新 蒋世全 周建良等 (511)

电磁波随钻测量系统及现场功能性实验分析..... 王 磊 彭烈新 张连成等 (518)

电磁波接力传输随钻测量系统“套管信道”衰减规律分析
..... 季 锋 胡 超 王忠生等 (524)

基于 USB 采集卡的随钻探管测量校正 周 静 梁 耀 (527)

随钻声波遥转换能器技术研究..... 谢海明 周 静 (535)

一种基于电磁场的跨测试阀地面直读技术..... 庞东晓 张明友 项培军等 (545)

欠平衡钻井中声波遥传信号的传输与检测..... 燕并男 周 静 尚海燕 (551)

声波钻杆信道的仿真..... 尚海燕 周 静 燕并男 (560)

高频振动冲击钻具的破岩机理及实验分析..... 李 玮 谢 天 闫 铁等 (569)

岩屑床清洁工具叶片水力参数设计与模拟分析研究..... 邵 帅 孙晓峰 闫 铁等 (575)

常规空气锤水平钻进的可行性分析..... 赵 之 孟英峰 李永杰 (580)

AD 区块复合钻井用 PDC 钻头个性化设计 郭 鑫 张立刚 李士斌 (588)

随钻径向井壁取心工具的研究及应用..... 胡 畔 陈 立 李伟成等 (594)

第一部分

钻井技术发展 with 规划研究

石油天然气钻井工程科学技术发展规律探讨

苏义脑 周煜辉

(中国石油集团钻井工程科学技术研究院)

摘 要: 分析两千余年的油气钻井科技发展历史进程表明, 钻井科技发展遵循自然增长 S 形分形规律。自 20 世纪 90 年代初起, 油气钻井科技进入旋转钻井时期的第三阶段——自动化钻井阶段, 至今已进入中期的高速增长期。国内外学者预测, 21 世纪将发生第四次技术革命, 必将推动自动化钻井向其高级阶段——智能化钻井发展。

关键词: 油气钻井科技 历史进程分析 科技发展规律

在石油天然气工业中, 钻井是一项具有以下两个功能的人地工程: 其一是为油气增储上产而开辟并保持从地表到地下目的层的通道; 其二是采集所钻地层的信息。它也是一个多目标、多参数、他组织的复杂系统工程。钻井科技的作用是在人地的工作状态下, 统筹协调系统各参数, 充分发挥通道与信息两大功能, 以获得系统目标的综合优化结果。

从 20 世纪 60 年代起, 国内外不少学者对科学技术本身的发展规律不断进行探索, 先后提出了知识积累模式理论、科技革命理论、波浪式发展规律理论和逻辑型规律 (S 形规律) 理论等。进入 21 世纪后, 在整合以上各种理论的基础上, 提出了科学技术发展的自然增长 S 形分形规律理论模型。S 形分形规律理论模型的基本内容为: 科学技术的发展是无限的, 但其发展进程具有时段性; 每一时段的主导技术发展速度呈现“初期和晚期低”而“中期高”的特点, 故其知识、技术含量的累积量呈 S 形曲线增长; 任何一项具体的技术是有生命期的, 到其晚期, 发展空间趋近于零即发生危机, 但同时会有新一代技术在孕育成长, 最终替代原有技术, 即发生革命; 对科技发展进行长期 (超过 50 年) 的准确预测是很困难的, 或者说是大不大的可能的, 但并不否定可以进行中期和短期的预测。自然增长 S 形分形规律的提出是对科学技术发展认识的突破, 表明这一领域的研究已取得重大成果, 对各个行业研究本行业的科技发展具有一定的指导意义。

本文拟借鉴上述成果, 从分析油气钻井科技发展历史进程入手, 来初步探索油气钻井科技的发展规律。

1 油气钻井科技发展历史进程分析

有文字记载的最早油气井是中国于西汉宣帝地节元年 (公元前 69 年) 在四川成都市西南地区完成的临邛火井 (天然气井), 油气井的成井历史至今已有 2080 年。按成井方式 (包括破岩和清岩两个过程形成井筒的方式) 划分, 可清楚地分为掘凿成井、冲击钻井和旋

第一作者简介: 苏义脑, 教授级高工, 博士生导师, 中国工程院院士, 油气钻井工程专家。

转钻井三大时期。显然，只有进入冲击钻井时期后，才可称为“钻”井，才产生钻井工程。在这两千余年中，成井技术发生了四次重大变革。

第一次变革是器具革命，由掘凿成井发展到冲击钻井。

掘凿成井是人用手工工具操作，用凿子、锤子破岩，用铲子、篮子清岩。西汉张华著的《博物志》记载：“临邛火井一所，纵广五尺，深二三丈”。即井径为 1.15m 左右，井深为 4.6 ~ 6.9m。左思著的《蜀都赋》有生动的描述：“火井沉荧于幽泉，高焰飞煽于天陲”。此后有陕北的鸿门火井，川北的陵井火井等。这些火井都是在掘凿水井或盐水井时发现天然气，但这时未形成天然气产业。

北宋仁宗庆历年间（1041—1048 年），在四川发明冲击钻井（顿钻）技术，钻成“卓筒井”。冲击钻井是用竹木制成井架、绞盘、绳索，用铁铸钻头（圆刃锉），数人踩踏板使钻头上下冲击破岩，用捞砂筒清岩，用牛力驱动绞盘起下井内工具，实现了从人用手工具操作成井，到人力牛力并用和以竹木为主、铸铁为辅制成器具冲击钻井的转变；逐步形成了签井（布井位）、开井口（挖圆井）、锉大井（表层钻井）、下木（竹）柱（固井）、锉小口（二次开钻钻井）、见功（完井）的整套钻井完井工艺。卓筒井井径“碗口大”，即井径 10 ~ 20cm。冲击钻井与掘凿成井的区别是井径缩小、效率提高，钻深能力大幅度增加，是成井技术上的一大进步。

冲击钻井技术的发明加速了四川自流井气水田的开发与建设，到明天启年间（1621—1627 年），自流井气水田已有盐水井、天然气井 492 口，成为世界上第一个进行工业性开采的气水田。清道光十五年（1835 年）在开发自流井气水田过程中钻成燊海井，井深达 1001.42m，是世界上第一口井深超千米的井。该井初期日产天然气 8500m³，日产盐水 14m³，烧盐锅 80 口。1988 年 1 月 13 日，此井被国务院批准为全国重点文物保护单位。冲击钻井技术加速了中国井盐业的发展，同时也推动了中国和世界石油天然气工业的诞生。

第二次变革是机械革命，由冲击钻井发展到旋转钻井。

18 世纪第一次世界技术革命（蒸汽机和机械革命）和 19 世纪第二次世界技术革命（电力及输送革命）推动了油气钻井技术的这次变革。

1859 年，美国用蒸汽机驱动的冲击钻机钻成德里克井（Drake well），井深 69.5ft（21.2m），这是美国专门以产油为目的而钻的第一口井。它用蒸汽机替代了人力、牛力，用钢铁机械替代了竹木器具。由于这种变化，冲击钻井技术的生命期得以延长。

但更深刻的影响是使钻井方式发生变革，由冲击钻井发展到旋转钻井的第一阶段——转盘钻直井的阶段。第一口用旋转钻机钻成的油井是美国海湾地区的 Lucas Spindletop 井，井深约 1100ft（335m），于 1901 年 1 月投产。这次变革主要发生在钻井装备上，除用钢材替代竹木外，在结构上也有四方面变革：第一，研发了由转盘、方钻杆、钻柱组成的带动钻头的旋转系统；第二，研发了由泵、高压管线、水龙头和钻柱组成的循环系统；第三，先后用蒸汽机、内燃机（主要是柴油机）、电动机作为动力；第四，钻头由圆刃锉发展到刮刀钻头及铣齿滚子轴承牙轮钻头。这种装备上的变革使冲击钻井的断续破岩和清岩发展为连续破岩和清岩，从而提高了钻井效率，提高了钻深能力，由冲击钻井的千米钻深上升到旋转钻井的万米钻深。

20 世纪 70 年代，美国研制成动力水龙头，把旋转驱动点由转盘上移到水龙头处，相应开发出自动锚头、液压大钳、气动卡瓦等钻台工具，发展了顶部驱动系统，从而提高了接单根与起下钻效率及防止井下风险的能力，同时，也宣告了转盘钻井技术生命的终结。

第三次变革是能量革命，旋转钻井由转盘钻直井发展到用弯角结构井下动力钻具钻定向井。

转盘钻井破岩用的是机械能量（钻头刀刃利用钻铤重量先压入地层，然后旋转剪切破岩），从 20 世纪 30 年代开始，苏、美两国研究在机械能量外再增加水力能量破岩，但两国在开始时走了不同的技术路线。

苏联走了间接利用水力能量之路，于 1934 年开发出带减速器的液力式井下动力钻具即涡轮钻具。由于驱动钻头的旋转点下移到钻头之上，而整条钻柱不转，如果在涡轮钻具之上加一弯接头使钻头上产生一侧向力，则可使钻头稳定地在设定的方向上钻进，钻出一种新的井型——定向井。苏联在世界上第一次用这种方法于 1934 年在老格鲁兹尼油田钻成定向井，从而打开了弯角结构井下动力钻具钻定向井阶段的大门，使旋转钻井技术进入第二阶段。不久又开发出带不带减速器的涡轮钻具，除钻成了常规定向井外，还钻成了丛式井、多分支井等定向井井组。到 20 世纪 50 年代，定向井在苏联已得到规模性应用。

美国走了直接利用水力能量之路，于 1934 年开始研究水力喷射式钻头（包括刮刀钻头和牙轮钻头），于 1948 年在得克萨斯州和海湾地区进行了 26 口井的喷射钻井试验，获得大面积的成功；后又开发出“三合一”牙轮钻头（普通牙轮钻头的改进型）和 PDC 钻头（刮刀钻头的改进型），进一步提高了喷射钻井的效率。中国于“五五”计划期间，对喷射钻井技术组织了产学研集体攻关，获得成功后又连续 10 年大力推广，使全国平均机械钻速（ROP）翻了一番，证实了这项技术可以大幅度提高钻井效率。由于喷射钻井要求机泵输出功率高及钻井液的固相含量低，开发出了大功率机泵组，并对钻机的循环系统进行了改造，开发出包括“两筛”（两个钻井液筛）、“两除”（除砂器、除泥器）和“一机”（离心机）的罐式系统，使钻井地面设备更趋优化。

由于涡轮钻具的工作转速很高（大于 500r/min），与钻头性能不匹配，美国于 20 世纪 50 年代开发出了容积式井下动力钻具——螺杆钻具。但当时，无论是哪种井下动力钻具上配弯接头，都只能钻出长半径定向井（小于 $8^{\circ}/30\text{m}$ ），无法满足定向井钻井要求，80 年代初，美国利用螺杆钻具内部有柔性结构（万向轴）的特点，把弯角结构下移到此处，开发出弯外壳螺杆钻具。由于提高了钻头侧向力，钻出了中曲率半径的定向井（造斜率为 $8^{\circ}/30\text{m} \sim 20^{\circ}/30\text{m}$ ），螺杆钻具逐步替代了涡轮钻具成为定向钻具中的主要井下工具。美国利用这种新型井下动力钻具，最终钻成了水平井、大位移井等定向井。

苏、美接力开发的定向井，至今已成为占钻井工作总量 90% 的开发井的主要井型，是钻井技术的又一次飞跃。

第四次变革是信息革命，使旋转钻井进入了自动化的新阶段。

定向钻井的核心技术是井筒轨道控制技术，对井筒轨道参数（井深、井斜、方位、工具面角）信息要求高。虽先后开发了氢氟酸测斜仪、照相测斜仪及电子单多点测斜仪等，但仍无法满足要求。20 世纪 70 年代，法国斯伦贝谢公司开发出了有线随钻测斜仪，不久又发展为无线随钻测斜仪，把对井筒轨道的测量由“事后”（井筒轨道钻出后）推进到“实时”（边钻边测井底近处的信息）。之后，随钻测量的参数又扩展到地质和工程两大类，解决了钻井工程长期存在的所钻地层不确定性和井下工作状态隐蔽性的两大难题。实时测量为实时井下控制创造了前提，从而敲开了旋转钻井的第三阶段——自动化钻井的大门。

自动化钻井也是在井筒轨道控制技术领域首先获得突破。1990 年，美国贝克休斯公司在德国的大陆科学探井（完钻井深 9100m）钻探中，首先开发成功自动钻直系统（VDS）。

该系统由无线随钻测量仪和机电液一体化的三翼块控制机构两个分系统组合而成，如今已进入商业技术服务。于 20 世纪 90 年代中后期，美国的贝克休斯、哈里伯顿及法国的斯伦贝谢等大型钻井技术服务公司，又开发出了旋转导向钻井系统。该种系统的控制分系统今有翼块式和柔轴式两种，但钻头侧向力仍偏低。

进入 21 世纪后，自动化钻井开始拓展到井下风险（指由地层引发的喷、漏、塌、卡、阻等井下复杂情况和事故）控制领域。2005 年法国斯伦贝谢公司开发出控压钻井系统（MPD），对地层孔隙压力进行实时控制。该系统用 PWD 实测井下流体压力，增设专用机泵组与井口节流阀连接，除原有的调节钻井液密度的手段外，还增加了向井内补注液压的控制手段。由于向井内注液压所需的时间很短，故该系统具有对井下流体压力实时辨识快速控制的能力。MPD 技术的开发，预示了在技术上消灭钻井工程中井喷失控这种灾难性事故的前景。

自动化钻井的第三个领域是地面操作自动化。现在看到的有起下钻自动化、固井注水泥自动化和钻井液配制自动化等。地面各工序操作自动化可以大幅度降低钻井工人的劳动强度，提高操作效率，体现了以人为本的精神。

随着自动化钻井的发展，还可能拓展到钻井工作的其他领域。

2 认识与结论

（1）油气井成井的 2080 年历程，按破岩和清岩构成的成井方式可划分为三大时期：掘凿成井时期（公元前 69 年—公元 1041 年）、冲击钻井时期（1041—1901 年）和旋转钻井时期（1901 年至今）。旋转钻井技术至今的 110 年又可划分为三个阶段：转盘钻直井阶段（1901—1934 年）、弯角结构井下动力钻井具钻定向井阶段（1934—1991 年）和自动化钻井阶段（1991 年起）。

（2）在以上五个时段中，油气井成井技术发生了四次重大变革。前两次变革的结果是直井的钻井效率和能力大幅度提高，井深的量级由 10m 上升到万米。第三次变革的结果是发明了一种新的井型——定向井，开拓了一个钻井的新领域——海洋钻井。直井和定向井现已分别成为探井和开发井的基本井型。在进行井筒本身深度和方向的变革后，第四次变革则转向钻井各工序操作的优化，包括提高操作的控制效率、精度和保护人身、生态安全。

（3）对油气井钻井科技发展全部历史进程进行分析的结果表明，油气钻井科技发展遵循自然增长 S 形分形规律。

（4）在科技发展的每一时段都有其主导技术，时期与时期、阶段与阶段的转换主要是主导技术的转换。某时段的主导技术进入晚期后，其技术发展空间逐步趋近于零，当满足不了新的需求时，即产生技术危机，但同时人们必然要进行多方向的探索，其中必有一种探索脱颖而出，成长为新一代的主导技术，即发生技术革命，从而进入一个新的时段。故技术发展呈常态技术—危机—革命—新常态技术的波浪形状态，是否定之否定的不断循环。由于新技术是在老技术发展后期中孕育成长，以及老技术的技术生命结束后，在生产中还会延续使用一段时间，故新、老主导技术的替代是一个重叠、渐变的过程，而且重叠的时间较长。中国是发明冲击钻井的国家，当中国于 20 世纪 30 年代开始用旋转钻机钻井后，冲击钻井仍在延续使用，直到 2005 年延长油矿最后一台冲击钻井钻机入库，才结束了冲击钻井使用的历史。中国于 20 世纪 50 年代开始进入定向井钻井阶段，但转盘钻井仍在使

直到 80 年代开发出顶部驱的系统使钻头旋转驱动点上移后，转盘钻井技术才逐步退出历史舞台。故加速新、老技术的转换，必须要用创新的观点打破技术惯性与保守性。

(5) 任何一项具体技术都有其生命期，遵循有限生长规律，S 形曲线反映了其“幼年”、“中年”和“老年”的生命全过程。自 20 世纪 90 年代初油气钻井进入自动化阶段后，至今已历时 20 年，并在井筒轨道控制自动化技术上首先突破，表明这一阶段已经走过低速增长的“幼年期”，开始进入高速增长的“中年期”。不少著名科学家预测，21 世纪将发生第四次世界技术革命。机器人、仿生技术和纳米材料的开发，量子计算机和信息量子传输的探索，表明这次技术革命即将来临。可以期望，即将来临的这次技术革命，将推动钻井自动化向其高级阶段——智能化方向发展，钻井自动化将成长为一棵枝繁叶茂的大树。旋转钻井时期的科技发展进程如图 1 所示。

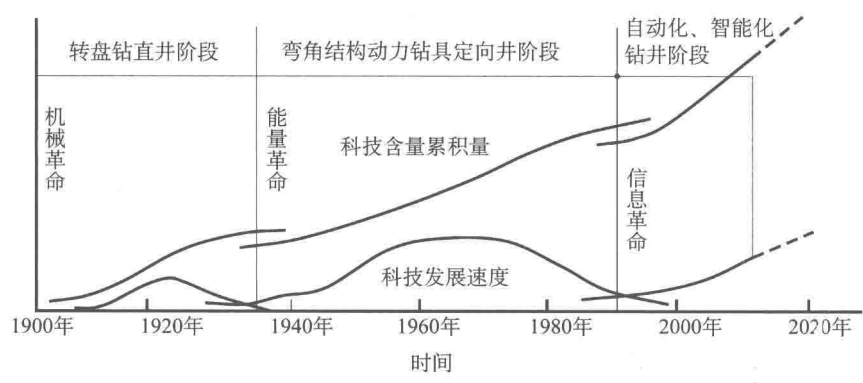


图 1 旋转钻井时期的科技发展进程示意图

(6) 每时段的主导技术都包括核心技术和配套技术两部分，这两部分技术按生成树法则发展，逐步形成成套技术。随着直井钻深能力增加，相应悬重、扭矩、地层温度、压力和可钻性级别随之增加，以及穿过的地层增多，就开发出大功率钻机，由刮刀钻头开发出 PDC 钻头，由普通牙轮钻头开发出“三合一”牙轮钻头，用焊接高强度钻杆代替细螺纹钻杆，耐高温的钻井液及水泥浆，高压等级井口装置、地面罐式循环系统，以及用地层孔隙压力和破裂压力确定全井套管程序方法等。定向井钻井的核心技术是井筒轨道的设计、测量和控制技术。设计技术的发展是由单井（常规定向井、水平井和大位移井）到井组（丛式井、多分支井）；测量技术的发展是由“事后”（井筒钻出后）到“实时”（边钻边测），再到地质导向；控制技术的发展是由弯接头加涡轮钻具到弯外壳螺杆钻具，再到弯角地面可调。但定向井井筒轨道的“斜、弯、平”也给钻井工作带来一系列问题，包括井下管柱与井壁的摩擦大幅度增加，下井管柱及电缆是否可下到预定井深，卡钻和井塌的风险加大，偏心环空对携屑和固井注水泥质量的影响，以及钻屑沉积于下井壁，大长度水平段储层浸泡时间延长等，这些问题如得不到解决，核心技术就不能顺利实施，定向钻井技术就难以大规模应用，故必须开发一系列的配套技术。上述的每一个问题就是技术生成树上的每一个节点，当一个问题解决后就长出一个新的分枝，到 S 形曲线中段后期，主导技术就成长为一棵枝繁叶茂的大树。直井是设计井斜为零度的定向井，故定向钻井的技术生成树原则上也适用于直井。定向钻井技术生成树如图 2 所示。

(7) 混沌动力学否定了科技发展长期准确预测的可能性，根据现代科技发展速度逐步加快的趋势，这个“长期”的时间约为 50 年。但混沌动力学并不否定中期及短期预测的可

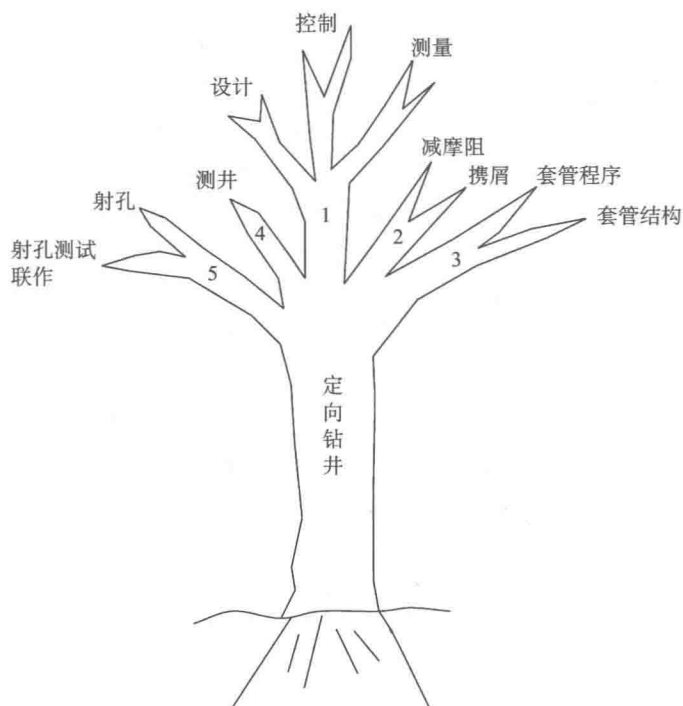


图2 定向钻井技术生成树

1—井眼轨道；2—钻井流体；3—套管固井；4—电缆测井；5—射孔试油

能。进行中期预测即进入一个S形曲线后，即可预测其发展趋势，并在发展趋势的前沿找出技术制高点。进行短期（几年）预测，则可判明在规定的时间内技术制高点攻关所能达到的尺度。准确进行中期及短期预测是制定科技发展规划和计划的基础。

一言以蔽之，技术的发展遵循“第一原理，分层否定”的原则或规律。所谓“第一原理”，是指社会或市场对该项技术的本质需求和完善的指标要求；所谓“否定”，就是发展，需求推动发展；而“分层”，则是否定的级别和层次，从而决定了技术发展的级别和层次。对工程技术而言，其“第一原理”就是要做到八个字：安全、优质、效益、环保。工程技术的任何发展，实际上都是针对上述不同方面和不同层次进行“否定”的结果。具体到钻井工程技术，就是要做到“更深、更快、更便宜、更清洁、更安全、更聪明和更高产”。

参 考 文 献

- [1] 刘广志. 中国钻探科学发展史 [M]. 北京：地质出版社，1998.
- [2] 《中国石油钻井》编委会. 中国石油钻井 [M]. 北京：石油工业出版社，2007.
- [3] 吴国盛. 科学的历程 [M]. 北京：北京大学出版社，2002.
- [4] 刘大椿. 科学技术哲学导论 [M]. 北京：中国人民大学出版社，2007.
- [5] 杜石然，范楚玉，陈美东，等. 中国科学技术史稿 [M]. 修订版. 北京：北京大学出版社，2012.
- [6] 胡光宇. 战略定量研究基础——预测与决策 [M]. 北京：清华大学出版社，2010.
- [7] 赵健，雷蕾，蒲小勤. 分形理论及其在信号处理中的应用 [M]. 北京：清华大学出版社，2008.