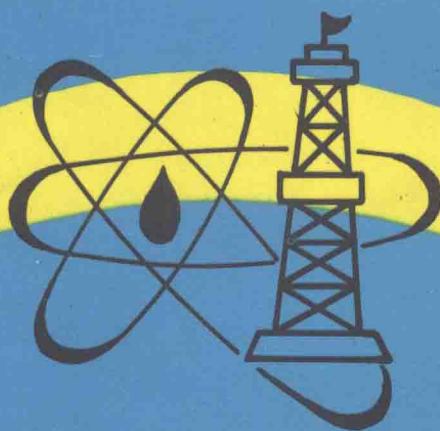


面向二十一世纪的能源科技

——中国科协第21次“青年科学家论坛”报告文集

杨慧珠 刁顺
高德利 赵文智
编

石油工业出版社



面向二十一世纪的能源科技

——中国科协第 21 次“青年科学家论坛”报告文集

高德利 杨慧珠 赵文智 刁顺 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是中国科协第 21 次“青年科学家论坛”报告文集。本次论坛的活动主题是“面向 21 世纪的能源科技”，邀请活跃在能源领域（如石油、煤炭、核能、水电等）科研与管理第一线并已取得突出成绩的年轻教授、研究员和高级工程师共计 39 人参加，共收到论文 32 篇。内容涉及能源的勘探开发、加工转换与综合利用，以及节能、环保和能源经济管理等方面的最新研究成果（或成果精选）。它们在一定程度上反映了我国能源科技领域的研究水平和研究中遇到的主要问题，提出了对我国能源发展问题的深刻认识与建议等。

本书可供能源科技工作者及高等院校师生阅读，也可供能源及相关部门的管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向二十一世纪的能源科技:中国科协第 21 次
“青年科学家论坛”报告文集/高德利等编.
北京:石油工业出版社, 1997.6
ISBN 7 — 5021 — 2042 — 4

I .面…
II .高…
III.能源—研究—文集
IV.TK01 — 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 09356 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
地矿部河北地勘局测绘院印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787 × 1092 毫米 16 开本 15¹/₈ 印张 390 千字 印 1 — 1000

1997 年 6 月北京第 1 版 1997 年 6 月河北第 1 次印刷

ISBN 7 — 5021 — 2042 — 4 / Z · 115

定价: 30.00 元

前 言

本书收集了 32 篇研讨能源科技问题的学术论文,都是由出席中国科协第 21 次“青年科学家论坛”的代表们撰写。内容包括他们在各自研究领域所取得的最新研究成果(或成果精选),在一定程度上反映了我国能源科技领域的研究水平和研究中遇到的主要问题,提出了对我国能源发展问题的深刻认识与建议等。

能源是进行现代化建设和提高人民生活水平所必需的重要物质基础,与国民经济发展和社会进步息息相关。同时,能源也是一种战略物资,是全球政治和经济斗争的争夺对象。因此,能源问题为世界各国所关注。我国是一个人口众多的发展中国家,能源资源相对不足(只及世界平均水平的一半),目前的能源消费水平仍很低,并且以煤炭为主。随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高,我国的能源开发与利用必将大幅度增长,能源发展中的问题愈加突出。

就世界范围而言,目前的能源结构中石油和天然气占较大比例(超过 60%),煤炭不足 30%。随着社会的发展,世界总的能耗将不断增长,同时,能源结构也将由石油占统治地位向多元化发展。与世界能源结构状况有所不同,我国现在是、未来一定时期也必将是一个以煤炭为主要能源的经济大国。我国不但在能源结构中优质能源严重不足,而且在地区分布上也不平衡,主要能源资源都在秦岭以北,即华北与西北。因此,我国能源存在的主要问题是:(1)能源效率低下;(2)优质能源供需矛盾尖锐;(3)能源所致环境污染严重。在我国能源发展中,为了解决存在的严重问题,一是需要实施节能优先的能源战略,二是需要大力勘探开发和利用国内外的优质能源,三是积极促进能源多元化发展(如开发核能、水能、太阳能、风能及生物质能等),四是要求能源开发利用与环境保护协调发展,等等。所有这些举措,除了能源政策和管理之外,将主要依赖于能源科学技术进步,因而也为能源科技工作者提出了许多面向 21 世纪的新课题,需要认真讨论、研究和解决。

为贯彻中共中央、国务院《关于加速科学技术进步的决定》和全国科技大会精神,中国科协设立了“青年科学家论坛”,其目的是为扎根国内并已经取得一定成就的青年科技工作者提供一个良好的学术交流园地。目前,我国有一批活跃在能源科技领域 45 岁以下的跨世纪青年学术带头人,他们在各自的研究领域已经取

得了突出成就。继中国科协成功地举办了数次“青年科学家论坛”活动之后，高德利等教授发起了以“面向 21 世纪的能源科技”为主题的中国科协第 21 次“青年科学家论坛”，并得到了能源领域青年科学家们的热烈响应。根据中国石油学会、中国煤炭学会、中国核学会、中国能源研究会和中国地质学会等学术团体及有关部门的推荐，本次论坛邀请活跃在能源科技领域（如石油、煤炭、核能、水电、太阳能等）的 39 位青年科学家代表（均具有高级职称，其中 32 位具有博士学位），出席于 1997 年 6 月 20 日至 22 日在北京举办的 3 天学术活动，其目的是要在一个良好的气氛里自由讨论能源发展中的热点科技问题。这次论坛活动由石油大学高德利教授、清华大学杨慧珠教授和北京石油勘探开发科学研究院赵文智高级工程师（教授级）担任执行主席，在“面向 21 世纪的能源科技”主题之下，分成两个报告单元，即：

(1)能源发展中面临的理论和技术难题及其对策；

(2)能源的综合利用与能源效率的提高问题：包括节能问题、环境保护问题及能源结构优化与能源经济问题等。

我们希望通过这样的学术活动，增进相互了解，促进学科间的相互交叉渗透，拓宽视野，启迪思维，发掘更多的跨世纪优秀科技人才，推动能源科技事业的发展。

最后，我们要特别感谢中国科协对本次活动给予的关心和支持，同时感谢中国石油天然气总公司对本书的出版给予的资助，特别感谢石宝珩局长和陆基孟副局长的热情关心和大力支持。在筹划和组织本次论坛活动的过程中，我们得到了中国石油学会、石油大学和北京石油勘探开发科学研究院等单位的热情帮助，以及一些老专家的热情咨询。石油大学学位办的巫荣京同志及北京石油勘探开发科学研究院地质所的宋岩同志做了许多日常工作，在此一并表示衷心感谢。

高德利等

1997 年 5 月于北京

目 录

油气勘探开发中的若干工程问题	高德利 (1)
从力学角度看地球物理勘探的发展	杨慧珠 朱亚平 倪逸 (15)
中国陆上石油工业的发展潜力与前景	赵文智 宋岩 何登发 胡素云 (22)
中国能源结构与煤炭科技发展的思考	谢和平 (31)
加快天然气勘探开发, 努力改善我国能源结构	陈永武 宋岩 (38)
从油气资源特点看我国油气勘探发展战略	金之钧 (47)
中国油气资源及勘探对策浅析	朱筱敏 (53)
中国前陆盆地的油气分布与勘探对策	何登发 (61)
渤海湾盆地深部油气资源评价及开采技术	姜在兴 肖尚斌 (71)
探索岩层力学中的非确定性	张玉卓 (77)
岩土材料分叉分析及其在能源工程中的应用	潘一山 (83)
中国选煤技术的现状与发展	赵跃民 (90)
中国煤炭资源及洁净煤技术	杜铭华 (100)
我国水煤浆技术的开发及其意义	朱书全 (109)
我国煤炭市场发育运作的若干问题	雷仲敏 (115)
我国实行节约优先战略的对策研究	胡秀莲 (122)
电动热泵技术在北京地区调荷节电中的应用研究	曾鸣 赵九斤 (131)
低温土壤热源的开发与利用	朱峰 徐秉业 (138)
甲烷催化部分氧化制合成气反应工程研究	徐健 魏伟胜 鲍晓军 (142)
未来汽油的质量要求与炼油工业的对策	谢朝钢 (152)
面向 21 世纪的几项重要炼油技术	聂红 戴立顺 王亚民 刘学芬等 (160)
重油加工技术及其在我国的应用	吴辉 (165)
21 世纪核能技术与发展	陈炳德 任勇 (173)
浅析我国的核电发展及铀资源现状与技术对策	侯惠群 (183)
高温气冷堆技术及其在我国的发展	孙玉良 (189)
核废物的安全处置是影响我国核电发展的重要因素	王驹 (196)
地球物理勘探压电材料的裂纹问题	刁顺 (201)
水利水电工程坝基岩体质量快速精细检测新技术研究	肖柏勋 (206)
测井数据格式统一: 油气勘探的关键技术问题之一	李宁 (216)
计算机化与盆地模拟给油气勘探开发带来的机遇与挑战	吴培康 (221)
地震新技术在大气区勘探中的应用及意义	李维新 (226)
盆地流体动力系统研究——指导油气勘探的一条有效途径	康永尚 郭黔杰 (230)

油气勘探开发中的若干工程问题

高德利

(石油大学, 北京 100083)

摘要 首先, 本文提出了油气井工程领域的主要科学问题, 它们是力学问题、化学问题及多学科交叉问题等, 并且论述了这些问题的主要研究内容和目标。然后, 阐述了在井下过程控制、油气井管柱力学、地层特性评估及井壁稳定性等方面的部分研究结果, 可供同行专家学者参考与指正。最后, 面向 21 世纪, 列举了油气勘探开发中的若干关键技术, 探讨了未来钻井与掘进技术的核心问题。

一、引言

在油气勘探开发的现实工作中面临着许多难题, 其中工程技术问题十分突出, 如深井钻探及保护储层问题、高温高压海洋钻探问题、水平井及大位移井钻井与完井问题等。(1)在我国西部, 由于地面和地下条件复杂以及油气埋藏深等原因, 勘探中面临着各种意想不到的技术挑战。例如, 在深井钻探中, 经常遭遇井塌、井漏、井斜、卡钻、钻具失效及低钻速等复杂情况, 采用常规技术往往很难驾驭这种场面, 结果不仅造成了巨大的直接经济损失, 而且制约了西部油气勘探的步伐。(2)在我国东部老油田, “稳油控水”及提高采收率的难度很大, 同时还需要进行外围及深部勘探工作, 对工程技术提出了更高的要求。例如, 水平井技术(包括钻井、完井、测井、采油及修井等配套技术)还需要进一步研究与完善, 以便在技术和经济上适应东部油田开发生产的新要求。(3)在我国海洋石油发展中面临两个难题, 一是用一般的勘探技术(包括物探、钻井等)很难找到新的大场面, 二是用常规技术不可能对边际油田进行经济有效的开发。为了解决这两个难题, 中国海洋石油总公司在国家科委支持下, 正在大力研究和开发高新勘探技术(高分辨率及多波地震技术、高温高压钻井技术等)、海洋大位移丛式井技术及水下多相流油气自动开采技术等, 并被列入国家“863”计划。

因此, 从油气勘探开发的实际工程问题出发, 深入提取科学问题, 确定主攻方向, 进行多学科交叉学术研究, 同时, 大力开展科技攻关和高新技术开发, 努力提高工程技术水平, 这对于更好地实现油气勘探开发目标, 确保石油工业持续稳定的发展, 具有十分重要的战略意义。

二、油气井工程中的主要学术问题

油气井是人类探查地下油气资源并将它们采出地面的必不可少的通道。油气井工程是围绕油气井的建设、使用及维护而实施的耗资巨大的技术密集型工程, 主要包括钻井、固井、完井、录井、试井、修井及增产作业等环节, 是油气勘探开发工程的重要组成部分, 也是国

家教委认定的具有三级学位(学士、硕士、博士)授予权的学科专业。油气井工程专业,具有交叉学科的特点,涉及的主要科学问题有三点^[1,2]。

1.工程力学问题

(1)油气井工程流体力学:包括环空流、井筒流及高压水射流。①油气井环空和井筒流体力学,主要研究环空和井筒水力学理论及钻井液携岩理论,不同流体(牛顿、宾汉、幂律)在环空和井筒中的流场分布,多相流在环空和井筒中的运移流动特性,不同井身剖面(直井、定向井、水平井)中钻井岩屑床的形成及运移规律等,为油气井工程水力设计与控制提供科学依据。②高压水射流技术,是应用射流动力学、两相流、空化与气蚀理论、机械学、材料科学等众多学科知识,研究和开发出的一系列以射流为能量载体的工具和技术。它主要用于提高岩石破碎效率,加快钻进速度,也可用于固体切割、工业清洗等作业。

(2)油气井管柱力学。在油气井工程中需要使用多种管柱,如钻柱,套管柱,完井管柱,修井管柱,以及采油杆管系统,等等。油气井管柱力学的主要任务,就是综合应用基础科学的理论和方法,测试和分析各种管材的性能(包括管材的物理性能、化学性能、力学参数及密封性能等),研究管柱在各种井眼(直井、定向井及水平井)中的力学特性,如管柱的稳定性、动态特性、整体受力及机械强度等,为管柱的优化设计、合理使用及其寿命预测等提供科学依据。管柱力学今后研究的重点,是深井、定向井、水平井及大位移井中的管柱力学问题,主要内容包括:①杆管柱屈曲;②杆管柱整体受力和变形;③杆、柱运动学;④杆、柱振动与疲劳;⑤底部钻具组合(Bottomhole Assembly,简称“BHA”)分析;⑥杆管柱应力和应变。

(3)石油工程岩石力学。以岩石力学基本理论和实验技术为基础,研究深井和定向井安全快速钻井以及油田开发过程中所遇到的地下岩体中与岩石力学有关的各种工程问题,指导钻采工程的合理设计,解决地下比较隐蔽的事故,灾害的预防及其它工程难题。主要研究内容包括:①深井岩石的强度、塑性、可钻性及研磨性等力学特性随井深变化的规律;机械、水力破岩机理和规律;破岩工具的设计和革新;钻速方程和模拟仿真。②油田构造的地应力;模拟深部温压条件下的岩石强度,弹性模量,力学参数及流变特性等试验;不同工程问题(例如水力压裂,出砂,套变等)的模拟试验和数值计算分析。解决井壁稳定、套变套损的预防、水力压裂设计及油田开采中的出砂等问题。

2.化学问题

以“钻井与完井液化学”为例。它是以化学、粘土矿物学及石油地质学为基础理论,解决与钻井液、完井液有关的生产实际问题,主要研究新型钻井与完井液的处理剂、体系配方、流变性、废弃液处理以及计算机在钻井与完井液工程中的应用等,以满足各种复杂条件下钻井、完井及特殊工艺的要求,实现安全、高速、优质钻进,有效地保护油气层及矿区环境。

3.多学科交叉问题

(1)井下过程控制。这是一个多学科交叉研究方向,涉及工程、力学、地质、测量、计算机应用、机械和控制论等诸多学科领域,试图通过井下系统(包括硬件和软件)的设计与研制、地质环境预测、状态测量及计算机仿真分析等研究,实现对井下过程的定量预测和有效控制,以便按设计要求达到目标。例如,定向钻进过程控制,就是试图采用合理措施(包括底部钻

具组合、操作参数及测控系统等), 强制钻头沿预置轨道破碎地层而钻达地下目标。定向钻进过程控制品质受到多种复杂因素的干扰, 其中包括地层特性, 底部钻具组合(BHA)和钻头的定向钻井特性及其随钻变化, 井眼空间狭小及其稳定性, 等等。因此, 要实现定向钻进过程的自动控制目标, 还必须在物理模型、智能软件、执行机构及测控系统等方面进行大量的多学科交叉研究和探索工作。

(2) 油气井信息开发与应用(以钻井为例)。运用信息论、运筹学、计算机科学及仪器仪表测量学等手段, 录取、储存、分析、研究钻井过程中各参数变化特征, 包括钻机参数变化、泥浆参数变化、地质参数变化, 以及循环钻井液所携带的井下不稳定信息与地层流体信息等, 并利用计算机技术及人工智能方法分析与处理这些信息, 从而优选钻井参数, 预测与监测井下复杂情况。

(3) 地层钻井特性评估。通过理论分析和实验, 建立合理的物理模型和计算方法, 以便利利用钻井、地震及测井等信息资料, 评估和预测地层压力、岩石性质(包括岩石强度、岩石可钻性和岩性变化)及地层各向异性等, 为工程设计和施工提供依据。

以上这些研究方向反映了油气井工程学科的主要特点, 符合实际工程需要及技术发展趋势。通过这些研究, 形成工程理论和方法, 再经过综合开发和试验, 便可形成实用的油气井工程技术, 如: 油气井优化设计技术, 油气井工艺技术, 油气井过程控制技术(包括质量和安全控制等), 油气井数据采集与综合应用技术, 等等。

三、若干研究的进展

近 10 年来, 在改革开放的大好形势下, 我国在油气井工程方面开展了大量科学研究工作, 硕果累累, 从而有力地促进了油气井工程技术的大发展, 逐渐缩小了我国与西方发达国家在这方面的差距。本文主要介绍近几年来由笔者主持进行的一些研究进展情况。

1. 井眼轨迹定向控制研究

井眼轨迹定向控制技术, 是定向井、丛式井、水平井及大位移井钻井成套技术的关键环节, 也是科研中的难题, 有关的研究工作在国内外受到普遍重视。围绕这一重要课题, 我们在“八五”期间结合国家重点科技攻关任务开展了大量研究工作, 初步建立了一个井眼轨迹定向控制理论体系^[1~4]。

(1) 底部钻具组合(BHA)分析。首先对 BHA 小挠度问题进行研究, 建立了相应的力学模型及计算机分析系统, 并在向井、丛式井钻井试验中得到应用与验证。后来, 为了适应水平井钻井的需要, 对 BHA 小挠度分析理论的适应性进行了研究, 并提出了水平井 BHA 大挠度分析方法, 给出了相应的变形控制方程及定解条件等。在此基础上, 应用加权残值法进行求解, 研制了 BHA 三维大挠度分析系统(命名为 BHASP_{3D}), 它可以在微机上运行, 能迅速计算水平井转盘钻底部钻具组合的三维力学特性, 便于在现场推广应用; 建立了纵横弯曲梁柱挠度曲线的通用方程式, 进而研制了水平井导向钻具组合的计算机分析系统(命名为 NDS_{2D}), 从而为科学设计、选择和使用这种钻具组合提供了一个重要手段。应用 NDS_{2D}, 对目前国内外水平井钻井中常用的单弯双稳导向钻具组合进行了定量计算和分析, 经过大港油田水平井钻井试验验证, 得到一些重要结论和认识。

(2) 钻头与地层相互作用研究。这是定向控制理论研究中的一个关键课题。由于人们对地层的几何产状及物理特性等复杂情况知之甚少, 所钻遇的地层又千变万化, 再加上钻头破岩

机理又十分复杂,从而造成了钻头与地层相互作用研究的复杂性。为了便于研究,往往把一些有代表性的地层假设为横观各向同性或正交各向异性材料,同时考虑钻头的各向异性钻井特性,试图建立一个比较合理的钻头与地层相互作用模型。我们利用岩石可钻性概念,并采用等效处理和矢量分析方法,建立了钻头与正交各向异性地层相互作用模型,给出了有效钻力的新概念,并建立了有效钻力模型。该模型,将钻进方向与所钻地层、所用钻头及其力学性能有机联系起来,可作为井眼轨迹定向预测和控制的物理准则,具有如下用途:①确定钻头的钻进方向;②推论钻头及典型地层的各向异性钻井特性;③与 BHA 分析程序相配合,既可作为正模型使用以进行钻前预测等正演计算,又可作为反模型用以评估地层各向异性等。

(3) 钻头和地层各向异性钻井特性的表达方法。我们定义了两个重要参数,即“造斜特性参数”(E_{α})和“变方位特性参数”(E_{φ})。它们是与地层各向异性、地层几何产状、钻头各向异性、钻头指向及井眼方向有关的无因次物理量,可用来综合表达钻头和地层的各向异性钻井特性。基于钻头与地层相互作用模型,我们建立了 E_{α} 和 E_{φ} 的数学表达式,并提出了一种图形分析方法,从而可在微机上绘制彩色井斜特性图(或 E_{α} 图)和方位特性图(或 E_{φ} 图)。从这两个图上,可以清楚地定量认识钻头和地层各向异性对井斜和方位漂移的影响规律。这种图形分析方法及其计算机处理程序,便于在现场推广应用。

(4) 定向控制计算系统。将有效钻力模型与 BHA 分析程序结合使用,从实际工程的需要出发,我们研制了定向控制计算软件系统,它可以在普通微机上运行,便于在现场推广应用。该软件系统的主要功能包括:底部钻具组合力学特性分析,井斜变化预测计算,稳定器安放位置优化计算,钻压法控制计算,地层各向异性评估计算,以及典型地层造斜规律图示等。

(5) 邻井距离扫描技术。在定向井(或水平井)单井施工中,要求实钻井眼轨迹按设计轨道进入靶区,并尽可能打中靶心,即要求“中靶”。在丛式井设计和施工中,不仅要求“中靶”,而且要防止井与井交叉相碰,即“防碰”。无论是为了“中靶”还是为了“防碰”,都需要清楚地了解相邻两口井(设计井与实钻井,或实钻井与实钻井,或设计井与设计井)之间在任一井深的空间相对位置。进行邻井距离扫描计算与绘图,可以帮助定向井技术人员更好地做到这一点。我们分别采用三次样条函数插值法和最小曲率法拟合井眼轨迹,建立了先进的邻井距离扫描数学模型,在此基础上,从实际应用出发研制了邻井距离扫描的计算软件系统(简称“HWS 程序”),并在油田得到应用和验证。

(6) 参数研究。在旋转钻井中,井眼的形成是钻头与地层相互作用的结果,亦即钻头的钻进轨迹便是井眼轨迹。在相互作用中,钻头的力学特性(即钻头的机械作用力和转角)是直接影响井眼轨迹的重要因素,它基本上取决于 BHA 的受力和变形。因此,影响钻进轨迹的主要因素,一般应包括 BHA 结构(包括钻头),钻井操作参数,已钻井眼几何及待钻地层等。其中, BHA 结构及钻井操作参数,是可以人为控制的主观因素,而地层特性则是不可人为改变的客观因素;井眼几何在钻前是预测和控制的对象,在钻后则可通过测斜而获知。井眼几何的形成,既与主观因素有关,也受客观因素的影响。同时,已钻成的井眼几何又会产生反作用,它不仅对 BHA 的受力和变形具有较大影响,而且对地层的各向异性钻井效应也有不可忽视的作用。为了科学地进行井眼轨迹预测和控制,有必要认真研究上述诸种因素对井眼轨迹的作用机理。以 BHA 分析及钻头与地层相互作用研究为基础,通过参数研究,得到具有指导意义的结论和认识^[1]。

2.管柱力学研究

在“八五”期间，我们在钻井管柱力学方面开展了如下研究工作：

(1)探讨了垂直井及小斜度井钻柱屈曲的形式，并分析了屈曲变形与井斜之间的相互影响；在分析螺旋屈曲时，考虑了扭矩对钻柱与井壁之间接触力等方面的影响，得出了有用的结论；对屈曲与运动之间的关系问题进行了深入探讨。

(2)研究了底部钻具的涡动问题，一方面探讨了钻柱涡动的起因、利弊及其一般描述方法，建立了钻柱涡动微分方程，另一方面还讨论了钻柱涡动特性及其影响因素，并应用涡动特性分析现场问题，得出了有用的结论。

(3)定性探讨了各种因素对深井钻柱摩阻的影响，重点研究了钻柱受压段的摩阻问题；通过对摩阻的计算，讨论了钻柱涡动发生的可能性，以及摩阻与运动的相互影响。

(4)对钻柱动力特性进行研究，讨论了钻柱振动的起因及其研究方法，重点对钻柱横向振动进行了全面分析；引入了双轴非比例循环的概念，研究了耦合振动对钻柱的危害。另外在整体钻柱受力分析的基础上，讨论了深井钻柱强度设计与校核方法。

3.大斜度定向井套管扶正设计研究

利用实钻井眼轨迹数据和下入套管的各种特性，考虑影响套管的挠曲变形因素(包括扶正器间距、套管自重、井斜角、方位角、井眼曲率、轴向载荷、液体密度差和套管初始弯曲等)，对套管扶正器的最优安放间距进行了研究，得出了比较符合工程实际的挠曲变形公式。

(1)实钻井眼轨迹数据的处理。在钻井现场，定向井井眼轨迹是用实钻点的弧长、井斜角、方位角来描述。在套管挠曲变形的计算中，视套管弯曲程度不同，采用非均匀弧长离散，利用实测点数据，通过插值确定每两个测点间的各节点参数；利用二次抛物线模拟井眼轨迹，得出定向井井眼轨迹任一点的曲率，该曲率反映了节点的连续、平衡等约束条件。

(2)套管柱扶正计算方法。套管柱受井眼轨迹和扶正器的约束，受力状况复杂。利用钻柱整体受力分析方法，结合套管柱在井眼中的实际工况，对整个套管柱进行受力分析，建立合适的套管力学模型和合适的边界条件及初始条件，得出相应的方程。通过整体坐标(大地坐标)和局部坐标(自然坐标)的转换，利用数值计算方法，可以求出各个节点处的作用力。在对套管进行不均匀离散的基础上，对每一跨套管作等曲率假设，建立套管力学模型，得到套管挠曲变形微分控制方程。根据工程需要，通过数值计算，可以求出套管扶正器的最佳安放位置。

(3)应用软件。根据上述理论和方法，编制了相应的应用软件，它可用来进行套管扶正设计及校核计算。

4.高效防斜打直理论

在对钻头至切点钻铤的静力和动力进行分析时我们发现，如果钻压足够大，使得底部钻铤能够保持涡动，那么在钻头处除了具备常规防斜打直理论的所有优点外，还增加了一个动态轴向附加力。在所有这些有利因素的联合作用下，使井斜能够很快地得到纠正，并保持良好的垂直钻进状态。我们称这种防斜打直方法为“钻压防斜打直”，它是一种高效防斜打直技术。

对于钻压防斜打直理论，没有过多限制，唯一增加的要求是钻压增大。大钻压下有几种机制起到防斜和降斜的作用：首先是惯性离心力；第二是重力分量，即常规防斜打直理论中的钟摆力；第三是周期性轴向附加力。钻压防斜打直理论是建立在钻具涡动的假设之上，只有施加足够大的钻压才能满足条件。中等钻压，往往既不能满足钻压防斜打直理论的基本要求，

又不符合传统防斜打直理论“轻压吊打”的限制条件，所以一般不使用。

钻压防斜打直技术在控制井斜时加大钻压，把防斜打直中的钻压控制从单纯小钻压发展为小钻压和大钻压，扩大了钻压的使用范围，发展了防斜理论，使鲁宾斯基的静力学防斜打直理论发展为运动学与动力学防斜打直理论。

5. 地层钻井特性评估方法研究

(1) 地层岩石可钻性研究。地层岩石可钻性是指在一定的钻井条件下，岩石抵抗破碎的能力。衡量岩石可钻性的指标有许多，如可钻性级值、抗钻强度等，选取何种指标取决于应用目的。目前岩石可钻性研究主要有两种方法，一种是直接测定法，即室内试验测可钻性级值。另一种是间接法，又称参数评估法。前者已得到广泛应用，对于后者的研究，是近几年才开始的。随着科学化钻井的发展，要求更深入地定量了解地层特性的变化，特别是实际钻井过程中，钻遇的复杂地层往往是非均质各向异性的，而且岩石可钻性沿全井井深随机变化，仅仅依赖实验测定的方法很难满足现场的需要。

① 测井解释评估。由于岩石的弹性力学特性与其测井响应值之间存在一定的关系，借鉴地球物理测井理论，可以建立理论模型。把地层钻井特性参数作为地层基本参数，直接利用测井数据反演，经过统计处理和聚类分析，即可建立相应井段地层岩石钻井特性参数的评估结果剖面，为新探区提供第一手资料。由于测井数据排除了实验中不确定因数的影响，直接反映了地层岩石的原始特性，故结果可靠性高，其准确程度与测井模型的计算方法有关。

② 实钻数据评估。若把钻井过程视为一个系统，则实钻中记录的数据就是系统响应的结果，其中必然蕴含着地层钻井特性信息。利用系统分析的理论和方法，经过反演分析，可以提取出系统的特性参数。这种方法最适合于地层岩石可钻性研究。经过对实例的计算分析表明，钻时最能反映岩石可钻性的影响。利用系统建模方法或机理模型，直接用工况条件下的实钻数据进行评估，可以较准确地做到反映可钻性的变化规律，这已在塔里木油田的实践中得到验证。

③ 间接评估新方法的研究。由于实钻过程是钻头与岩石相互作用的非线性复杂过程，目前的机理模型或经验模型还有待进一步改进或发展新的理论模型。为此，可以把系统分析中的方法如时序分析，人工智能法如神经网络理论、物理数学反分析法引入地层钻井特性的评估中，进一步丰富评估的手段。我们已在上述几方面作了初步工作，大量的理论问题和计算方法问题还需要进一步的研究解决。

④ 应用软件：地层可钻性分析及钻头选型软件系统，包括“岩石可钻性实钻分析系统”和“地层钻井特性测井评估及钻头选型系统”两个子系统。

(2) 地层岩性及钻头工况实时预测。80年代以来，综合录井仪作为一种能提供多种实时钻井参数的设备，在我国已逐步得到了应用。目前，我国许多油田的探井都配备了综合录井仪。综合录井仪能真实和实时地记录钻进过程中的各种技术参数的变化，它反映了地层岩性、钻头工况的变化。我们的研究就是从随钻录井资料入手，利用井下或地面的各种信息，例如：钻压、扭矩、转速、钻速等，结合地震资料、现有实钻井的测井、测试等资料进行地层岩性、钻头工况的实时预测、监测。这对于现场及时准确地了解所钻遇的地层岩性、岩石抗钻强度、岩石抗剪强度及当前的钻头工况，合理的选择、使用钻头，钻进参数优选，防止钻井事故的发生具有重要的意义。同时，它还可以帮助地质人员确定取心位置，判断是否需要电测，评价地层含油气的可能性。

根据能量守恒原理及钻头破岩机理，我们建立了地层岩性及钻头工况评估模型，进而研制了实时评估软件系统，可利用钻压、扭矩、钻速、转速等信息，随钻实时预测所钻地层的岩性及钻头工况，经现场初步应用，取得了良好的效果。软件系统具有如下主要功能和特点：

①软件的主要功能：实时预测、监测地层岩性变化；随钻计算和分析钻进参数、地层岩石力学参数，实时显示钻头工况、岩性剖面；实时数据采集、传输和管理，动态传输录井数据；实时连续地打印的预测结果；钻后综合分析及岩性剖面校正；钻进参数优选。

②软件的特点：

a.利用钻井资料实时预测地层岩性和钻头工况，主要优点包括：实时预测地层岩性变化，而常规的岩屑录井具有一定的迟到时间；当破碎的岩屑很细时，用岩屑录井获取地层岩性信息很难，而本软件所运用的方法弥补这一缺陷；本软件预测结果准确度较高；钻头工况的实时评估有助于技术人员合理的选择、使用钻头，防止井下事故的发生。

b.岩性剖面采用标准的岩性图例绘制，便于现场使用。

c.使用该软件系统还具有极大的经济性，无需进行取心和室内岩心试验，就能获得地层岩石力学特性参数，对于钻井工程中的钻头选型、钻进参数优选都有至关重要的作用。

d.软件开发工具选用了流行的中文版 Windows 和 Visual Basic 语言，结合了 Windows 友善的用户接口，使软件具有较高的可靠性和友好的操作环境。

e.帮助系统仿照 Windows 3.1 系统帮助文件编制，具有良好的兼容性，运用起来灵活方便，具有很好的实用性。

(3)地层孔隙压力评估方法。在石油勘探开发中，井下喷、漏、坍、卡等复杂事故的发生，往往与地层孔隙压力掌握不准直接关联，因而能否对地层孔隙压力进行正确评估，至关重要。

地层孔隙压力评估技术，大致可分为钻前预测、随钻评估及钻后评价三大类。钻前预测，是基于地层声波速度与地层孔隙压力之间的内在联系，利用地震资料预测地层孔隙压力的评估技术。然而，目前这种钻前预测的精度还比较低，只能作为钻井设计的参考。钻后评价，是利用钻后的测井资料和钻井地质资料评价地层孔隙压力的技术。由于该技术简单易行，评价精度较高，因而受到欢迎。在钻后评价计算中，目前常用的测井资料包括：声波测井，感应电导率测井，密度测井，以及中子测井等。这种钻后评价技术，是以泥页岩测井参数为基础的，对砂泥岩剖面以外的储集层(如石灰岩剖面等)不适用，而且它还具有评价滞后的不足。随钻评估，是利用随钻测量信息检测地层孔隙压力的实时评估技术。它是 60 年代中后期发展起来的一项重要技术，在国内外得到普遍应用。在石油工程中，常用的随钻评估方法包括 d_c 指数法、标准化钻速法以及页岩密度法等。然而，这些传统的地层孔隙压力随钻检测方法都存在一定的局限性，如 d_c 指数法，由于它没有考虑钻头类型、水力因素及钻头工况变化（如钻头磨损、崩齿等）的影响，因而往往会造成评估结果的误差较大，甚至严重失真，而且它对石灰岩、白云岩、膏岩等非压实规律地层尚不适用。因此，我们开展了随钻地层孔隙压力预测、检测新方法研究，并取得了一定的进展。我们提出了一个新的地层孔隙压力随钻评估方法，即岩石强度法，它克服了 d_c 指数法的不足，考虑影响因素较全面，预测精度比 d_c 指数法高，而且不需建立趋势线，从而减少了人为的误差。由于该方法基于岩石本身特性的研究，不同类型岩石具有不同的计算模型，所以它对地层岩性没有太严格限制，比 d_c 指数法具有更大适用性。

6. 井壁稳定性研究

保持井壁稳定，一直是钻井中的主要问题之一。据统计，世界各国每年消耗在处理这类问题的费用高达数亿美元。因此，人们从很早就开始了进行这一问题的研究工作。大多数的研究者都是从静力的角度进行研究，虽然取得了许多很有价值的结果，但这一问题一直没有彻底解决。

(1)定向井井壁稳定性研究^[12]。从岩石力学、地球物理测井、工程录井、环空水力学和钻井液化学等方面分析定向井井眼稳定问题，建立地层孔隙压力剖面、地层坍塌压力剖面和地层破裂压力剖面，以实现钻井液性能、井身结构及其它工程参数的优化设计。

(2)井壁动力稳定性的初步探讨。实际上，作用于井壁的泥浆压力是随时间变化的，是动态荷载。因为，钻柱或套管在充满井眼的泥浆中运动都会引起压力的瞬态波动，其大小和分布规律是影响井壁稳定的主要因素之一。波动压力的计算是制定泥浆附加密度的主要依据，与地层破裂压力结合就可确定起下钻的运动速度。对于井眼内波动压力大小和分布规律的研究，国内外学者均进行了大量的工作，取得了许多很有价值的结论。波动压力的实际作用使井壁受到突然施加的瞬态荷载，井壁附近的岩石的应力状态是一种动态响应。

针对多孔弹性岩石介质的井眼，我们通过计算，分析研究在不同荷载谱下的动力响应及其对井壁稳定性的影响，得到如下主要结论^[13]：

①几种荷载谱中，突加荷载的动力响应最大，对井壁稳定是最不利的。

②在这几种荷载谱作用下，对于不可渗透边界的动力响应比可渗透边界要大，即在不可渗透边界下，对井壁稳定更为不利。

③动力的响应时间和区域也是有限的，当 $t^* > 10$ 时（ t^* 表示无量纲时间），趋于静力解，响应的区域一般在 $0 < r/a < 10$ 内（ a 和 r 分别是井眼半径和任一点的极径坐标）。

④达到最大响应的的时间比荷载达到的最大值的时间要延迟一些。

⑤在不同荷载谱作用下，动力最大响应达到的时间是不同的，而且对不同的材料有不同的达到时间，最早响应的是衰减荷载中 β 值（衰减波形载荷指数）较大的情况，然后是突加荷载等。

⑥可由这几种基本的荷载形式进行组合，来分析实际荷载形式的动力响应。从上述的分析可以看出，井壁在动力荷载作用下表现出与静力不同的响应形式，稳定性变差。

7. 水力压裂力学研究

近年来，国内水力压裂力学的研究取得了重要进展，主要结果可概括如下（陈冶喜，1996）：

(1)考虑水力压裂施工特点，应用多孔弹性理论，导出了新的井壁围岩应力表达式，提出了更全面的斜井水力裂缝起裂判据。反映了垂缝和水平缝的起裂机理，适用于垂井、斜井和水平井起裂分析。

(2)建立了深部地层参数的测定和解释方法，开发了三轴应力条件测定原地应力的声发射技术，研制了更为简单适用的岩石断裂韧性测试仪，并建立了岩石断裂韧性与声波速度和动态弹性模量之间的统计关系，为利用现场地球物理测井资料预测地层岩石的断裂韧性打下了基础。

(3)建立了全三维裂缝扩展的数值模型，考虑了非均质地层特性及热孔隙弹性等因素对裂缝扩展的影响。

(4)利用面向对象编程技术开发了水力压裂模拟软件。该软件在 Windows 环境下运行，界

面友好,操作直观,计算效率高,有较好的在线帮助系统,适合于现场进行水力压裂优化设计。

(5)在相似理论研究的基础上进行了分层地应力条件下的水力压裂模拟试验研究,建立了大尺寸真三轴模拟压裂试验装置,实现了对水力裂缝扩展过程的动态监测。

四、面向 21 世纪的若干关键技术问题

1.若干综合性技术

深井、超深井技术

深井是指完钻井深为 4500 ~ 6000m 的井;超深井是指完钻井深为 6000m 以上的井。深井、超深井技术,是勘探和开发深部油气等资源的必不可少的关键技术。进入 21 世纪,我国西部及东部深层钻探工作将进一步加强,需要完成的深井、超深井比例将进一步增加。我国深井、超深井比较集中的地区有:塔里木盆地,准噶尔盆地,四川地区,以及南海莺琼大气区等。近几年的实践证明,由于地质情况复杂(诸如高温高压、高陡构造、难钻地层、多压力系统及不稳定岩层等),我国在这些地区(或其它类似地区)的深井、超深井技术尚未过关,表现为井下复杂事故频繁,建井周期长,工程费用高,从而极大地阻碍了勘探开发步伐。例如,在南海莺琼大气区的崖城 21-1 构造的钻探中,在深部地层钻遇高温高压天然气产层,地温梯度达到 $3.98\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$,产层孔隙压力大于 100MPa。1990 ~ 1991 年,中国海洋石油总公司曾在崖城 21-1 构造上先后开钻两口井,设计深度 4580 m,结果在钻井过程中频繁发生井涌、井漏、卡钻等井下复杂情况,导致两口井报废,造成 1.6 亿元人民币的巨额损失。两年后在该构造上又开钻了第三口井,钻至井深 4680 m 完钻,但钻井时间长达 268 天,钻井费用近 1.3 亿元人民币(不包括完井测试费用),代价也是相当高的。

在深井、超深井技术发展中,需要进一步研究和解决的关键技术问题包括:井眼稳定技术,井斜控制技术,高效破岩及洗井技术,固井技术,钻井与完井液技术,以及管柱优化设计技术。

(1)井眼稳定技术,是钻井安全保障技术中的关键之一,主要解决钻井过程中的漏、涌、塌、卡等复杂问题,包括所钻地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力的预测技术,井身结构的优化设计技术,以及钻井液的化学稳定技术等。在深井、超深井钻探中,需要重点解决的技术问题是:①大段泥页岩的井壁坍塌问题;②软泥岩的缩径问题;③高压盐水层、多套压力系统地层、盐岩层及膏泥盐地层的安全钻进问题;④高温高压气层的井眼稳定问题等。

(2)井斜控制技术,包括地层自然造斜特性的评估技术,底部钻具组合分析技术,钻压控制技术,高效防斜钻井系统的研制等。在深井钻探中,需要重点解决易斜地层(如高陡构造等)的防斜打直问题。

(3)高效破岩及洗井技术,包括水力、机械破岩工具研制及洗井设计,地层岩石可钻性的评价,以及破岩工具的优选等。在深井钻探中,需要重点解决深部井段、大尺寸井眼及难钻地层的高效快速钻进技术问题。深部井段是指 4500m 以上的井段,大尺寸井眼主要指 $\phi 444.5\text{ mm}$ 井眼,难钻地层包括硬塑性地层及其它可钻性差的地层。

(4)深井、超深井固井技术,应着重解决:①多油层小间隙($\phi 216\text{ mm}$ 井眼下 $\phi 177.8\text{ mm}$ 套管, $\phi 149.2 \sim 152.4\text{ mm}$ 井眼下 $\phi 127\text{ mm}$ 套管)尾管固井技术问题;②抗复合盐、超高密

度水泥浆技术问题;③长封固段、高压复合盐水油气层的固井工艺问题等。

(5)深井、超深井钻井与完井液技术,主要包括分层段钻井液控制技术,高压差防卡钻井液技术,高温(150℃~250℃)、高密度($> 2.0 \text{ g/cm}^3$)钻井液体系,以及储层(特别是石炭系油层)保护技术等。

(6)钻井与完井管柱,包括钻柱、套管柱及测试管柱等。在深井条件下,钻柱的优化设计,不仅要考虑钻柱自身的结构、重量及强度,而且要考虑钻柱在井眼中运动时所承受的摩擦阻力及动力载荷;套管柱设计,能够按固井质量要求考虑套管居中问题,能在强度设计中考虑套管磨损和腐蚀问题,以及地层对套管的高温 and 挤压作用等;测试管柱优化设计,必须满足高温高压测试安全及操作工艺的严格要求。

水平井技术

定义:水平段,井斜大于 86° 的井段;长半径水平井,造斜段的曲率半径 R 为859~215m,造斜率 K 为 $2^\circ \sim 8^\circ/30\text{m}$;中半径水平井,造斜段 R 为191~57m, K 为 $9^\circ \sim 30^\circ/30\text{m}$;中短半径水平井,造斜段的 R 为55~28m, K 为 $31^\circ \sim 60^\circ/30\text{m}$;短半径水平井,造斜段的 R 为28~9m, K 为 $60^\circ \sim 180^\circ/30\text{m}$ 。目前钻的水平井,大多属于中半径水平井,因为这种类型的水平井具有比较多的优点,如造斜段较短、摩阻较小、定向控制中靶精度较高及不需要特殊完井等。水平井钻井的技术关键主要包括:(1)优化设计技术:需要多学科专业人员协同工作,综合考虑地质、钻井、测井、完井及采油等多方面的要求进行优化设计;(2)井眼轨迹控制技术:要求控制精度高,按“矢量中靶”要求进入水平段,并保持钻头在油藏内水平或横向钻进达最终目标;(3)优化完井技术:根据水平井几何类型及油藏特性等,确定合理的完井方法,优化设计完井管柱等。

另外,还有一类在工艺上具有一定特殊性的水平井,包括径向水平井、侧钻水平井及多底分枝井技术等。径向水平井(又称超短半径水平井)钻井技术,要求配备专门的井下钻井系统,并采用高压射流破岩方法,可从直井(一般是老井或工程报废井等)中径向打小井径(一般为 $\phi 100\text{mm}$)水平孔,水平段长度约为15~60m。侧钻水平井技术,可以用来在老井和工程报废井中侧钻水平井(主要是小井眼短半径水平井),这特别有利于老油田的挖潜开采。多底分枝井技术,允许在同一主干井眼(直井、定向井、水平井及老井等)中侧钻两口或多口分枝定向孔(通常是水平孔),以便更高效地开发离散的“布袋”油藏,节省平台和投资,特别适合于海洋及“破碎”油气藏的开发,目前,该技术仍存在的最大问题,是尾管完井的技术及效率问题,有待进一步研究解决。

大位移井技术(Extended-Reach Well,简称 ERW)

大位移井,是指测深(Measured Depth, 简称为“MD”)等于或大于垂深(True Vertical Depth, 简称为“TVD”)2倍的定向井或水平井,当 $\text{MD}/\text{TVD} > 3$ 时,则称为特大位移井(Mega-reach Well)。据报到,1995年9月BP勘探公司在英格兰 Wytch Farm 油田钻的第七口大位移井 LM-05SP 井,水平位移达8035m(测深8700m),是目前的世界纪录。大位移井钻井与完井的技术关键包括:井身剖面和钻柱优化设计,降低摩阻和扭矩及下套管技术,井眼稳定技术,井眼轨迹控制技术(正在试验旋转导向钻进控制技术),洗井与固控技术,以及钻柱振动控制技术等。在海洋及滩海油气勘探和开发中,应用大位移井技术,可获得明显效益。

连续柔管技术(Coiled Tubing, 简称 CT)

该技术是最近几年在石油工业中引起广泛重视的一项新技术。CT是一种高强度、低碳钢

管(杨氏模量 $2.0387 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 屈服强度 $4921 \sim 6327 \text{ kg/cm}^2$), 连续制造, 一般长约 $914.4 \sim 7620 \text{ m}$ 。传统的油井作业中, 操作者需要将平均长为 9.144 m 的钻杆一节节连接起来, 并需要用井架悬持。而在使用 CT 的时候, 柔管缠绕在两端有凸缘、筒径为 3.81 m (甚至更小) 的滚筒上, 象打捞绳一样在井中起下。传统钻井中使用的钻杆平均直径为 $41.275 \sim 168.275 \text{ mm}$, 而连续柔管的直径和壁厚分别为 $25.4 \sim 12.7 \text{ mm}$ 和 $2.032 \sim 6.35 \text{ mm}$ 。与传统的技术比较, CT 由于其经济合算、操作高效及有益环保等特点, 因而在油气钻井、完井、修井及测井等作业中逐渐得到推广应用。单就钻井而言, CT 技术在侧钻水平井及小井眼钻井中已获得成功应用。然而, CT 在使用过程中暴露出不少问题, 包括 CT 的屈曲、摩阻、挤毁及低周疲劳破坏等严重问题, 有待进一步研究解决。

保护油气层技术

在目前世界油价仍然偏低的形势下, 国外比过去更加注重通过油气层保护的手段来提高勘探、开发的效益。随着近年来钻探和采油新技术的发展, 以及岩心分析和其它检测技术方面取得的突破性进展, 目前工业界在诊断和治理油气层损害方面已具有很大的潜力。今后几年, 预计保护油气层技术发展的重点技术内容包括: 油气层损害机理的快速诊断技术, 针对裂缝性油藏的钻井液暂堵技术, 探井保护油气层技术, 以及欠平衡钻井技术等。

小井眼钻井技术 (Slimhole Drilling)

应用这项技术, 可大幅度降低油田勘探开发的钻井成本。实践证明, 与常规井眼相比, 小井眼探井和评价井的钻井成本可降低 $40\% \sim 60\%$ 或更大, 生产井和注入井的钻井成本可降低 $25\% \sim 40\%$ 或更大。目前, 小井眼钻井技术越来越多地应用于老井加深、侧钻水平井、分枝水平井、欠平衡钻井及 CT 钻井等, 为老油田增产和提高采收率提供一个有效的途径。

2. 若干单项关键技术

地质导向钻井技术(Geosteering Drilling)

为了使油藏沿井眼更好地裸露, 需要用复杂的“地质靶子”(如地层中不同岩层或流体的界面)代替简单的“几何靶子”, 而这些“地质靶子”的精确位置往往是难以预测的。利用邻井测井资料建立测井响应模型, 当一口新井接近或钻进这样的“地质靶子”时, 可将实时随钻测井响应与上述模型响应进行比较, 以帮助识别底部钻具组合相对“地质靶子”的位置, 从而可将实钻井眼保持在适当轨道内, 更好地达到地质勘探和油藏开发的目标。为了改进这种服务的数模技术及整体可靠性和有效性, 国外(美国)正在进一步研究和开发。

钻井三维可视化技术

在丛式定向井、大位移井及多底分枝井钻井中, 利用计算机可视化技术, 可以更好地理解大量井眼轨迹或设计剖面数据, 以避免井眼之间发生相碰事故。同时, 这种可视化的数据显示形式, 在地质导向钻进过程中也将非常有助于钻井解释与决策。另外, 应用三维可视化技术, 对防碰软件及摩阻预测计算系统进行研究和改进, 将有助于从密集的平台钻特殊定向井。

现代油井设计技术

钻井今天所面临的技术和经济挑战, 使得油井设计与技术综合运用比已往任何时候都更为重要。明确钻油井的目的, 适当的油藏描述, 钻井参数的全面理解, 以及明确在钻井、完井和采油作业之间的相互关系等, 对于现代油藏开采来说是非常重要的。由于需要不同学科