

B.B. 库里奇茨基 著
鄢泰宁 郭湘芬 吴翔 陈劲 译

定向斜井与水平井钻井的 地质导向技术

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

定向斜井与水平井钻井的 地质导向技术

B.B. 库里奇茨基 著

鄢泰宁 郭湘芬 吴翔 陈劲 译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书分析了按最优剖面对定向斜井和水平井轨迹进行初级控制和高级控制的技术,给出了在钻井过程中借助于井底遥测系统进行电磁波测井和电阻测井的物理依据。阐述了地质导向技术的理论及用涡轮回转钻进法施工高质量定向斜井和水平井的地质导向工艺,讨论了深水平井钻进的环境保护技术与工艺。书中还介绍了用地质导向技术建设水平井的实例及其开采运营的经验。

本书可供石油、天然气工业的工程技术人员、科学工作者以及钻井地质工作者和地球物理工作者使用,也适用于石油天然气高等院校的本科生和研究生。

图书在版编目 (CIP) 数据

定向斜井与水平井钻井的地质导向技术 / (俄罗斯)
库里奇茨基著; 鄢泰宁等译.
北京: 石油工业出版社, 2003
ISBN 7-5021-4224-X

I. 定…
II. ①库…②鄢…
III. 油气钻井-定向钻进-技术
IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 024694 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)
河北省徐水县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 13 印张 332 千字 印 1—1500
2003 年 4 月北京第 1 版 2003 年 4 月河北第 1 次印刷
ISBN 7-5021-4224-X/TE·2970
定价: 26.00 元

序

改革开放以来随着经济的持续高速增长，我国已成为世界上第三大石油消费国、第二大石油进口国（其中 43.3% 来自中东）。可以预计，在今后全面建设小康社会的进程中，我国的石油需求量还将进一步增大。在当前形势下，加速我国石油工业发展，提高石油产量，增加石油资源储备，已成为我国政府和人民关注的热点之一。

纵观世界石油钻井技术，21 世纪将进入信息化、自动化钻井发展新阶段。自上世纪 80 年代以来，国际钻井界在施工复杂结构井（包括水平井、多分支井和大位移井）随钻测量和随钻地层评价等关键技术方面取得了重大突破。由于水平井增加了井筒与油藏的接触面积，分支井用于开发隐蔽油藏、断块油藏和边际油藏，大位移井在实现“海油陆采”方面具有的巨大潜力，从而为实现高效、低成本、立体开发油气藏奠定了技术基础。国际上一致认为，复杂结构井是当今石油工业上游领域增加产量、提高采收率的重要途径，在许多国家和地区复杂结构井的钻井工作量已占总进尺的 15% 左右。

施工复杂结构井的基础是以随钻测量为主的地质导向技术。随钻测量（MWD）和随钻测井（LWD）仪与井下钻具相组合可随钻测得井斜的角度、方位和造斜工具面向角等参数，求出井眼实时偏差矢量，并随钻测得电阻、 γ 测井和声波测井等资料，是实现地质导向、精确掌握井身状况和钻遇的地层剖面、保证钻头及时发现油气层的有效技术手段。

目前，我国普遍采用电缆式和水力脉冲式随钻测量（MWD）系统，其中，电缆式 MWD 系统多为国产仪器，使用不够方便；泥浆压力脉冲式 MWD 系统主要靠欧美进口，价格昂贵。俄罗斯研制的电磁波式 MWD 系统采用电磁波遥测技术实时接收反映井底轨迹方向、地层特性等信息，它不需要泥浆作为信号载体，数据传输能力较强，而价格却比泥浆压力脉冲式 MWD 低得多。

俄罗斯是一个油气资源丰富、钻井技术发达的国家，而且，目前对于我国正是以相对便宜的价格引进俄罗斯相关技术的时机。中国地质大学（武汉）在国内首次引进了俄罗斯的电磁波式地质导向仪器，并与俄方合作实现了该仪器操作界面的全面汉化。现在引进者又把该仪器研制者之一 B. B. 库里奇茨基教授的新书《定向斜井与水平井钻井的地质导向技术》翻译成中文出版。书中介绍了欧美与俄罗斯的 MWD 技术现状及定向钻井最优剖面的设计方法，阐述了泥浆压力脉冲式和电磁波式 MWD 系统的工作原理、仪器结构及其操作工艺，既有较强的理论分析，又有大量应用实例。相信该书的出版将帮助我国读者了解世界 MWD 技术的现状，有利于提高我国地质导向技术的水平，加速我国推广复杂结构井钻井技术的步伐。

值此《定向斜井与水平井钻井的地质导向技术》中文版问世之际，我们要感谢中国地质大学（武汉）鄢泰宁教授等人和石油工业出版社为翻译、编辑、出版原著付出的辛勤劳动。



2003 年 4 月 16 日

УДК 622.243.23

Кульчицкий В.В. Геонавигационные технологии проводки наклонно направленных и горизонтальных скважин. — М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000. — 350 с.

В книге рассмотрены технологии безориентированного и ориентированного управления траекторией наклонно направленных и горизонтальных скважин по оптимальным профилям, математические модели гидравлического канала связи, дано физическое обоснование электромагнитного и электрического каротажа скважин в процессе бурения в составе забойной телеметрической системы. Изложены основы геонавигационных технологий и представлены геонавигационные технологии высокоточной проводки наклонно направленных и горизонтальных стволов турботорным способом, экологически безопасные технологии и технологии проводки глубоких горизонтальных скважин. Описан опыт эксплуатации горизонтальных скважин, построенных по геонавигационным технологиям.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников нефтяной и газовой промышленности, а также геологической и геофизической службы, занятых бурением скважин, студентов и аспирантов вузов нефтегазового профиля.

Ил.131, табл.94, библиогр.143 назв.

К 2503010400 - 5434
ЛР № 020439 97 без объявления

©ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000

КУЛЬЧИЦКИЙ ВАЛЕРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ—



кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений РГУ нефти и газа им. Н. М. Губкина. Родился в 1953 г. Трудовую деятельность начал в 1971 г. в НГДУ “Хадыженнефть”. В 1977 г. окончил Грозненский нефтяной институт им. академика М. Д. Миллионщикова. С 1977 по 2000 г. работал в Западной Сибири: Мегионском УБР, ПО Нижневартовскнефтегаз, Нижневартовском отделе СибНИИНП, НижневартовскНИПИнефть. Генеральный директор НПО “Горизонт-Сервис”. В 1984 г. защищена диссертация по теме “Проектирование специальных профилей и разработка технологии бурения наклонно направленных скважин применительно к эксплуатации месторождений механизированными способами”.

В 1992 г. создал научно-производственное объединение “Горизонт-Сервис”, в которое входят научно-исследовательские и проектные, сервисные и производственные инжиниринговые предприятия: Сибирский научно-исследовательский и проектный институт “Нефтяные горизонты”, научно-производственные фирмы “Горизонты геофизического сервиса” и “Самарские горизонты”, научно-производственные предприятия “ЯмалГеоСервис”, “Авиационные технологии в бурении” и “Нефма—Горизонт”.

Научный интерес—мультидисциплинарный подход к освоению недр, находящийся на стыке аэрокосмической навигации, бурения, геофизики, геологии, экологии, добычи и разработки месторождений углеводородов по геонавигационным технологиям.

Опубликовано более 40 научных работ и получено 5 авторских свидетельств на изобретения и патентов.

译者的话

《定向斜井与水平井钻井的地质导向技术》出版于2000年。该书的作者——B.B. 库里奇茨基 (КУЛЬЧИЦКИЙ ВАЛЕРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ) 是俄罗斯自然科学院通讯院士、俄罗斯石油天然气学院天然气与凝析气开采与开发教研室的教授、“新型天然气工艺”科研生产中心主任。他生于1953年,自1971年开始在石油天然气企业工作,1977年毕业于格罗兹尼石油学院。1977~2000年在西西伯利亚钻探局和若干油田工作,1984年以“特殊井眼剖面设计及用定向斜井开采油藏的钻井工艺研究”为题通过了副博士论文答辩。自1992年开始创办石油天然气开发与仪器公司,并兼“Самарские горизонты”公司副总经理。他的学科专长是应用随钻导航技术通过多分支井开发碳氢化合物矿藏,他的学术活动涉及到钻井、地球物理、地质、油气田开发的生态环境等领域,已出版40多篇学术论文并获得了5个发明证书和专利证书。1986~1989年他与全苏地球物理研究所合作完成了俄罗斯第一台国产无缆式井底遥测系统。1996年曾用ZTS-172电磁波式井底遥测系统在东塔尔科沙林斯克油田完成了第一口深水平井№1231井的测试,在该井内沿电磁波通道传输信息的深度达3143m。

众所周知,用大位移定向斜井和水平井开采石油天然气是21世纪的一场技术革命,是石油天然气工业科技进步的优先发展方向。当前,全世界石油天然气的开采水平与定向斜井和水平井钻井工艺及其导航技术密切相关。尤其在低产油气田和难采油气矿床的开发中更是如此。应用随钻导航技术监控井眼轨迹是钻井技术与电子信息技术相结合的重大成果,是实现用大位移斜井、水平井及分支井合理开采地下油气藏的重要技术手段。同时,在固体矿床勘探、地热开发、非开挖铺管等工程领域也有着广泛的应用前景。在定向钻井中必然面临如何提高测量精度,保证定向准确性的问题。近年来,我国的定向钻井技术方兴未艾,在钻井工程中普遍采用电缆式和水力脉冲式井底遥测系统,把井底及其造斜工具的角度信息和地球物理信息发送至地表。其中,电缆式MWD系统多为国产仪器,只能用于井底马达钻进条件下,其测量工具要穿过水龙头下入,因而每接一个单根都必须提出测量仪器。现在,采用侧入接头,虽然不必提出随钻仪就可接钻杆,但成本很高。泥浆压力脉冲式MWD系统的缺点在于价格昂贵,脉冲信号不直观,反映孔底的信息量相对较少。而俄罗斯研制的电磁波式MWD系统是将反映井底轨迹方向、地层特性参数的低频电磁波信号传送到地面。它不需要泥浆作为信号载体,所以,数据传输能力较强。电磁波传输的优点是不需要机械接收装置,系统稳定性好,而价格却比水力脉冲式低得多。

在中国地质大学(武汉)“211工程”项目的资助下,2002年3月,在我们赴俄罗斯考查并引进ZTS-108电磁波式井底遥测系统的时候,B.B. 库里奇茨基教授把自己的新书《定向斜井与水平井钻井的地质导向技术》送给了我们,并表示为了方便中国读者尽快了解俄罗斯在该领域的现状授权我们把该书译成中文出版。该书较全面地介绍了国际上与俄罗斯的定向钻井技术现状及其最优剖面的设计方法,阐述了泥浆压力脉冲式井底遥测系统和电磁波式遥测系统的工作原理、仪器的结构及其操作工艺。书中内容既有较强的理论分析,又收集整理了几种井底遥测系统的研究与应用实例,并辅以大量相关数据、图表和运营单位的实

实践经验，写法深入浅出，通俗易懂。译者衷心希望通过本书的翻译出版能对国内石油天然气、煤层气、地热、矿产勘探和其它从事定向钻井的学者、科研人员和院校学生提供有益的帮助。

在该译著正式出版之际，译者要衷心感谢 B.B. 库里奇茨基教授向我们赠送原著并委托我们翻译成中文出版，感谢石油工业出版社为编辑、出版、发行该书付出的辛勤劳动，感谢中国地质大学（武汉）工程学院、“211 工程办公室”对电磁波式 MWD 项目和本书的大力支持与资助。

由于译者水平有限，书中的缺点、错误在所难免，敬请专家和广大读者批评指正。

译者

2002 年 11 月于中国地质大学（武汉）工程学院

目 录

绪论	(1)
----	-----

第一篇 定向斜井和水平井井身轨迹的初级控制技术

第一章 定向斜井施工工艺在烃类矿产开发中的应用	(7)
1.1 定向斜井的剖面 and 下部钻具组合	(7)
1.2 用带扶正器的组合钻具钻进时工艺技术因素和地质因素对定向斜井井身弯曲的影响	(12)
1.3 定向斜井沿设计剖面钻进的概率	(14)
第二章 定向斜井的最优剖面设计	(19)
2.1 四段式剖面设计	(19)
2.2 五段式剖面设计	(26)
2.3 剖面的重新设计	(30)
2.4 按最优剖面钻进定向斜井时钻杆柱运动阻力的研究	(32)
第三章 定向斜井施工工艺	(36)
3.1 普通型下部钻具组合	(36)
3.2 大直径定向斜井的钻进工艺	(49)
3.3 初级定向斜井井身轨迹控制工艺的效果	(59)

第二篇 定向斜井和水平井井身轨迹的高级控制技术

第一章 井底遥测系统——实现定向斜井和水平井钻进的技术基础	(77)
1.1 具有不同信息通道的井底遥测系统	(77)
1.2 井底遥测系统综述	(79)
1.3 电磁波通道式井底遥测系统综述	(85)
第二章 水力通道式井底遥测系统	(88)
2.1 水力通道的数字模拟与实验研究	(88)
2.2 井底遥测系统的传输装置	(105)
2.3 水力通道的接收装置	(120)
第三章 电磁波通道式井底遥测系统	(133)
3.1 井底遥测系统在西西伯利亚油田的工业试验	(133)
3.2 井底遥测系统的台架试验	(137)
3.3 钻井过程中的电磁波测井	(140)
3.4 钻井过程中的电测井	(148)
第四章 定向斜井和水平井的施工工艺	(152)
4.1 带井底遥测系统的下部钻柱组合设计	(152)
4.2 用分支的方法钻进水平井	(160)

4.3 定向斜井和水平井中的涡轮回转钻进法	(165)
4.4 深部水平井的施工工艺	(172)
4.5 用于定向斜井和水平井施工的一体化地质导向技术	(176)
4.6 开发烃类矿床的生态安全问题	(180)
4.7 用地质导向方法建成的水平井的运营情况	(183)
结论	(188)
参考文献	(189)

(1) 中国石油天然气集团公司石油工程研究院 第一章

(2) 各层井段的不平衡地层压力的应用 1.1

..... 非常规油气储层的开发应用及钻井工程对策 1.1

(3) 1.1

(4) 1.1

(5) 第二章

(6) 1.2

(7) 1.2

(8) 1.2

(9) 1.2

(10) 1.2

(11) 1.2

(12) 1.2

(13) 1.2

(14) 1.2

(15) 1.2

(16) 1.2

(17) 1.2

(18) 1.2

(19) 1.2

(20) 1.2

水基钻井液中的强碱性水基水平井钻井液 第二章

(21) 第一章

(22) 1.1

(23) 1.1

(24) 1.1

(25) 第二章

(26) 1.1

(27) 1.2

(28) 1.2

(29) 1.2

(30) 1.2

(31) 1.2

(32) 1.2

(33) 1.2

(34) 1.2

(35) 1.2

(36) 1.2

(37) 1.2

(38) 1.2

(39) 1.2

(40) 1.2

绪 论

用水平井开采石油天然气是石油天然气产业部门科技进步的优先发展方向,被认为是21世纪的一场技术革命。

当前,在世界范围内,石油天然气矿产的开采水平与水平井钻进技术的现状密切相关,水平井钻进技术的进步将明显提高石油天然气产业的经济效益,使地层的原油采收率提高2%~5%,单井产量增加3~9倍,因此,可在明显提高生产效率的同时减少油气田的钻井数量。

目前,俄罗斯应用水平井钻进技术的油气田多半属于低产油气田。为了降低单位采油成本,必须在低产油气田和难采油气矿床的开发中推广新技术,采用水平井体系。

在水平井钻进中必然面临如何提高测量系统准确性的问题。地表参数记录设备往往不能可靠地反映真实的井下钻进过程,从而很难保证钻井效果满足设计要求。近年来,国内外广泛采用井底遥测系统把井底的方位和角度信息、钻井工艺信息及地球物理信息发送至地表,它们所利用的通信渠道有电缆、电磁波、水力通道和声波通道。它们的共同点在于都包括了参数检测传感器、信号变换器、编码装置和电源模块。妨碍准确获取井底过程参数的不稳定因素主要有钻具的剧烈振动和钻压的脉动、工作环境的高温、电磁干扰、信号传输过程中的时间滞后和信号衰减。

电磁波通道的应用效果取决于钻井周围岩石的电物理特性。如果地层中含有矿化水,则电磁波通道的传输效果将受到很大影响。水力通道的传输效果与周围岩石的电物理特性无关,完全取决于钻井液的性能指标。电磁波通道和水力通道是相互补充的通信通道。目前,我国还没有国产的水力通道式井底遥测系统,普遍采用无电缆线的电磁波通道传输方式。而国外超过80%的场合是采用水力通道式井底遥测系统。

当前,俄罗斯的钻井工作量成倍下降,而水平井和大斜度井所占的比例却显著增大。随着石油天然气公司在烃类矿产开发方面的投资减少和与国外公司竞争的加剧,进一步刺激了俄罗斯工程企业开发和完善国产高水平地质导向技术的积极性,他们采取航天学、钻井学、地球物理学、地质学和矿产资源钻采与开发等多学科交叉的方法进行深入研究。

1980~1984年,笔者完成并鉴定了沿最优剖面施工定向斜井的技术,该技术可保证深水泵可靠地运行,并提高了油气田的回采潜力。1982年,在北波库尔斯克和阿甘斯克油气田实施的10口井中均采用最优剖面设计,即保证深水泵工作井段的顶角最小,并能利用斜井段钻开产油地层。通过研究钻井过程中工艺技术因素和地质因素对井身弯曲程度的影响,笔者开发了按最优剖面设计定向斜井的方法,提出了在下部钻具组合中不用偏斜工具的初级定向斜井施工工艺。

1986~1989年笔者与全苏地球物理研究所合作完成了第一台国产无缆式井底遥测系统ЗИС-4。实践证明,该井底遥测系统的结构完全满足钻井设备和岩石破碎工具运行的要求。

1987年,在沙模特洛尔斯克油田,借助ЗИС-4型井底遥测系统控制变向器的方向,完成了按最优剖面施工的№29055缓倾斜定向斜井。

1989年,在石油天然气生产联合公司的钻井干部学校教学实习基地,在钻进多井底4

分支井时试验了全套 ЗИС-4 型仪器的技术特性。在第 4 口分支井的 868m 深处最大顶角达 73.5°。在这次试验工过程中，对 ЗИС-4 型仪器主要结构的不足之处也进行了总结。

1990 年，在叶尔玛科夫斯克油田钻成了 №817 缓倾斜定向斜井，在 2098m 深处最大顶角达 76.7°。ЗИС-4 仪器的平均作业时间为 27.5h，最长工作时间达 104h。后来，为了在西西伯利亚成功地施工水平井和缓倾斜定向斜井，又对井身结构和剖面类型进行了重大改进。

1986~1990 年，石油工业部和下瓦尔托尔斯克石油天然气生产联合公司拨款研究开发缓倾斜定向井和水平井钻进技术，并在沙模托洛尔斯克油田施工了第一批水平井——№25738 井、29296 井、29297 井和 29299 井。

1992~1995 年，笔者领导完成了采用现代随钻导航技术在玛芒托夫斯克油田、南方油田、波卡玛索夫斯克油田和麦基昂斯克油田施工水平井和缓倾斜井（偏离垂线 2500m）的设计和预算文件。按照设计，玛芒托夫斯克油田钻成的水平井段位于贝齐亚赫城市下面。在南方油田由于钻了缓倾斜定向斜井使井的数量减少了一半，在西西伯利亚井身偏离垂线的最大距离达 2539m。随钻导航技术的经济效益得到了具体证实。

1993~1995 年，南方石油天然气公司在普里奥伯斯克等油田钻成了 №2213 井、6645 井等一批水平井并投入使用。其中，叶弗列莫夫斯克油田 №620 水平井的实践表明，在相邻井眼油层含水的条件下，用干式法开采石油的可能性达 90%。

1993~1996 年，钻成了俄罗斯最大的丛式井——由 12 个水平井组成的 №2040 井。在 №2042 丛式井施工第二批水平井的过程中，首次检验了国产随钻导航技术及其三个信息保障系统的可靠性，这三个系统是：地质—工艺研究计算机工作站、带电磁波通道的井底遥测系统和进行地球物理检测的自动化子系统。

1995 年，下瓦洛夫斯克石油天然气公司在科什里斯克油田的侏罗纪地层中钻成了第一口水平井 №493。

1995~1997 年，苏尔古特石油天然气公司在费多洛夫斯克和科尼特洛尔斯克油田用国产的 ЗТС-172 遥测导航仪和高精度的水平钻进涡轮钻具完成了 29 口水平井。

1996~1997 年，在科加雷姆斯克油田的 №44 丛式井中鉴定和推广了基于涡轮钻具的高精度快速定向斜井施工技术，从而使定向斜井的成井时间缩短了一半。

1996 年，布尔石油天然气地质公司在东塔尔科沙林斯克油田完成了第一口深水平井 №1231 井，在该井内沿电磁波通道传输信息的深度创造了纪录，达 3143m。1996~1998 年，在杰弗里诺—鲁斯全斯克等油田完成并投入使用的一批水平井和缓倾斜定向斜井的成果证明了用水平井和缓倾斜井钻开含油地层的效果。

1996~1997 年，在乌联戈依斯克凝析气田的下白垩统中钻成了 4 口水平井，当时采用的高精度随钻导航技术可保证水平井身在小于 60cm 的地层中穿过。

1998 年，在库谢夫斯克的天然储气层中用充气钻井液钻进 №158 水平井的过程中成功地检验了电磁波通道式 ЗТС-172 遥测系统。

1999 年，在东塔尔科沙林斯克油田的晚白垩世地层中用 ЗТС-172 遥测系统钻成了开采天然气的 №16 水平井。

1999~2000 年，在库谢夫斯克等矿区的一批水平井钻进过程中成功地检验了 ЗТС-172 遥测系统的电阻测井功能，其原理在于利用 ЗТС 系统中的结构元件作为物探测井的电极探头。

对井底遥测系统水力通讯通道的数学模拟和实验研究工作有助于开发水力通道式国产遥测系统，从而不仅可改变俄罗斯在这方面技术落后的现状，而且也可以在已有的电磁波通信通道成果的基础上进一步开发出具有组合通道的 MWD 系统。

批量生产的井底遥测系统还可用于难到达地区（水下矿产、居民点地下区域和禁区）的地质勘探和开发，由于可以施工偏离井口垂线距离达 2~3km 的定向斜井，从而可提高采油率，提高钻井在采油气作业中的效果。由于沿着最优剖面钻井并且提高了钻井速度，所以提高了钻井的质量。

如果没有从事现代随钻导航系统研制以及水平油气井钻井技术和钻井设计系统开发和试验的各公司、学院的同行们的帮助，该书的出版是不可能完成的。

作者向对本书各章节内容提出宝贵意见和建议的技术科学博士 A.T. 基玛季耶夫和 Ю.И. 斯杰勃列夫教授表示衷心感谢。

作者向在发展国产地质导向技术和发明地质导向设备工作中作出巨大贡献的“沙玛拉地平线”科技公司总经理 Г.А. 格里加什金表示衷心感谢。

作者向俄罗斯杰出的科技工作者、自然科学院院士、技术科学博士 А.Г. 加里宁表示衷心感谢，是他承担了全书的审阅工作。

第一篇

定向斜井和水平井井身轨迹 的初级控制^①技术

① 这里的“初级控制”代表俄语单词 БЕЗОРИЕНТИРОВАННЫЙ 的意思，即对井眼的方位角未作精确要求（下同）。——译者

第一章 定向斜井施工工艺在烃类矿产开发中的应用

1.1 定向斜井的剖面 and 下部钻具组合

大量的文献对最优剖面的问题进行了理论和实践的研究。最优剖面的基本要求是为成功地钻进定向斜井创造最有利的条件。所谓最优剖面，其应在充分考虑井队所用钻具造斜规律的基础上使钻井和固井的成本最低。井身剖面的共同要求是在安装采油机械设备的井段应具有最大的顶角和弯曲强度，而在设计地层的顶板处应具有尽可能小的顶角^①。

文献^[29]中列举了定向斜井的设计方法和选择下部钻具组合的基本原则。在选择合理的剖面形式时，必须考虑当时的工艺技术条件和岩石的地质特征，考虑生产技术规范 and 价格，考虑总的钻井费用是否最优。文献^[51]阐述了在西西伯利亚生产实践中对上述原则的发展，其主要内容包括如何简化钻井的结构，在深井中用带定心装置的钻具钻进时可能遇到的问题，如何提高钻头进尺和机械钻速，如何从一个井位上钻多个分支井。提出了6种普遍认为是比较好的剖面类型，它们在深井泵作业井段中具有最大的顶角值*。在选择定向斜井剖面类型和下部钻具组合时，还要注意钻进速度问题并保证井眼满足使用要求。

西伯利亚的有关科研院所的研究成果表明，在上述剖面类型中，4段式剖面将使深井泵的工作可靠性降低，同时会影响到气举井的有效工作系数。在该井段中电动离心泵的电缆常在往井内输送过程中出现机械损伤，泵的轴或电动机的轴也因疲劳磨损而出现断裂。分析表明，沙模特洛夫斯克油田多次出现大修事故都是由于电动离心机的电缆在强弯曲井段内出现了机械损伤。在定向斜井中采用气举方法时，随着顶角的增大，单位气耗量增长30%，同时，密封器件插接处的装配应力和断裂应力也随之增大。对照分析表明，电动离心泵和拉杆泵的大修周期与在定向斜井中悬挂装置的相对伸长量密切相关。根据泵所在工作井段的弯曲规律可以认为，大修周期的缩短与按4段式剖面类型所钻定向斜井的井身倾斜角呈函数关系。图1.1给出了电动离心泵的大修周期与所在井段的顶角和弯曲强度之间的关系。当弯曲强度大于等于 $5^\circ/10\text{m}$ 时，随着顶角减小，大修周期从140昼夜降至68昼夜，而弯曲强度为 $2^\circ/10\text{m}$ 时，大修周期仅减少了10昼夜。

石油企业中大量使用拉杆式深井泵采油。造成采油泵工作不正常的原因在于顶角（达 45° ）和弯曲强度（ $6^\circ/10\text{m}$ ）太大。出现柱塞卡死和拉杆断裂事故的原因是联轴节、拉杆与泵体的磨损。1980年仅在沙模托洛斯克油田就出现过29次采油泵的事故。对设备定期检修的结果表明，由于机械杂质落在柱塞和缸体之间，从而加剧了工作部件的磨损。对拉杆泵而言，其大修周期与弯曲强度和顶角的关系示于图1.2。与电动离心泵的情况相似，随着顶角的增大，设备的工作寿命下降。

4段式典型剖面的特点在于井眼几乎垂直地钻入含油层，使深井泵的下放深度和工作环

① 原文如此，可能属于印刷错误，“大顶角”、“小顶角”颠倒了。——译者