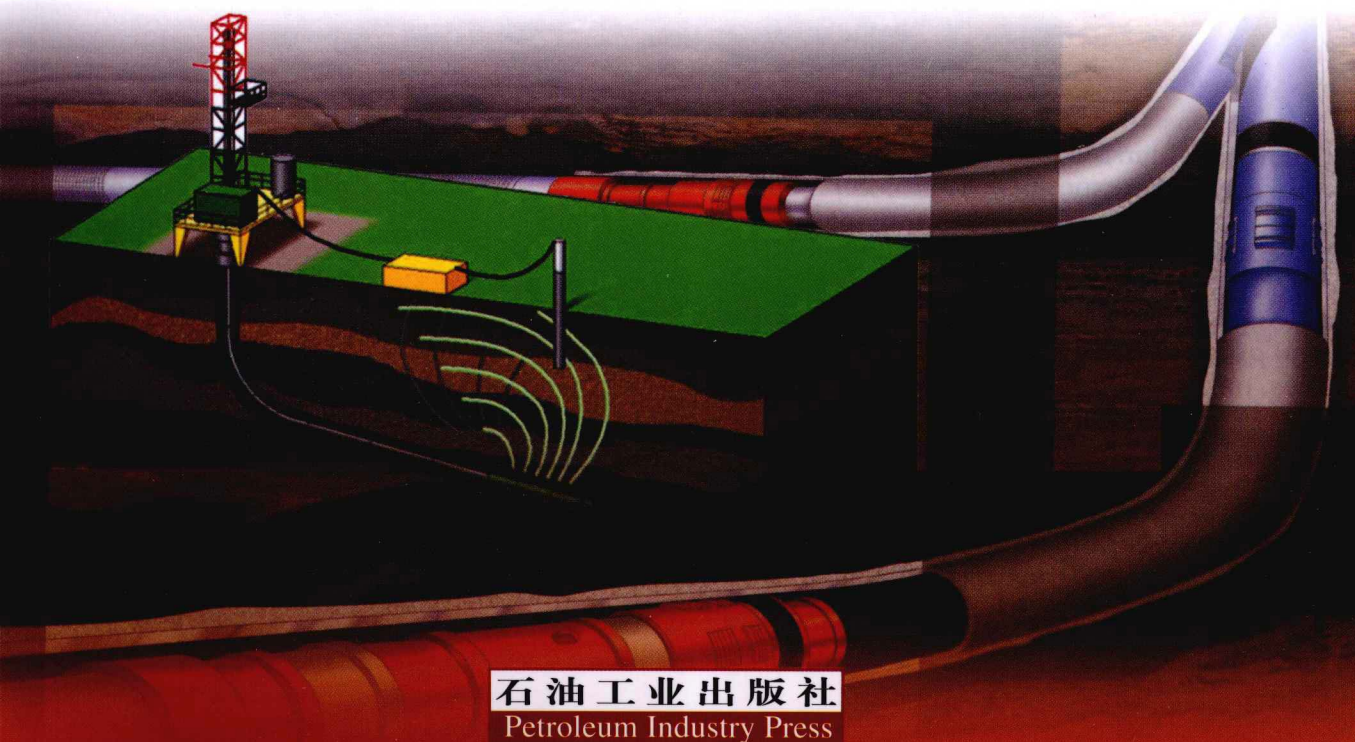




石油高职院校特色教材

定向钻井技术

王清江 毛建华 韩贵金 曾明昌 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高职院校特色教材

定向钻井技术

王清江 毛建华 韩贵金 曾明昌 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍定向钻井技术中的相关概念及井眼轨道、井眼轨迹的测量仪器及测斜计算的方法、各类定向专用工具、井眼轨迹预测与控制方法、双驱复合钻井技术以及现场先进的几种特殊钻井工艺技术,并较系统地介绍了常规定向井钻井技术和水平井钻井技术等方面的内容。

本书既可作为高职高专石油钻井技术专业的学生教材,也可作为从事石油钻井工作的职工培训及现场工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

定向钻井技术/王清江等编著.

北京:石油工业出版社,2009.8

石油高职院校特色教材

ISBN 978-7-5021-7217-6

I. 定…

II. 王…

III. 定向井-油气钻井

IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 094842 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)64523574 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.5

字数:394 千字

定价:25.00 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

前 言

石油钻探开发是一项高投入、高回报、高风险、技术密集、资金密集的行业,决策或操作的失误都会造成巨大的经济和社会损失。

随着我国海、陆油气勘探水平的提高,油气藏的类型变得复杂多样,低、特低渗透率油气藏所占的比例逐年增加;井深从浅、中深向深甚至超深发展;油气层的类型由常规扩展到非常规;沉积类型由人们熟悉的陆相沉积扩展到海相沉积;勘探、开发工作进入低、深、难的阶段,这就向油气开采提出了新的挑战。在这种情形下,再继续采用直井钻井技术将不能满足现代钻井的需要,由此,应运而生了定向钻井技术。定向钻井技术在现场的应用证明了它是目前提高采收率最直接、最有效、成本最低的重要钻井技术手段,同时也证明了大力发展定向钻井技术的必要性。

《定向钻井技术》是石油工业出版社 2007 年度的首批资助教材,它是高等职业教育钻井技术专业学生的一门专业技术课,是构成该专业学生专业技能的核心课程之一。本书共分八章,包括井眼轨迹的基本概念、井眼轨迹的图示法以及定向井的相关概念;井眼轨迹测量仪器及测斜原理介绍、MWD 磁干扰的分析判断方法以及井眼轨迹测斜计算方法;常规定向井工具、井底动力钻具、滑动钻进造斜工具、转盘钻进造斜工具及造斜工具造斜能力的预测方法;井斜方位漂移分析、井眼轨迹预测与控制方法;定向井井眼方向控制方案设计、常规定向井施工准备、定向井各井段的施工技术以及施工中的复杂情况和注意事项;双驱复合导向钻井技术的特点、导向钻具的选型和组合及其造斜特性分析、双驱钻井井眼轨迹控制技术的应用;水平井的轨道设计、靶区参数、井眼轨迹控制方案、钻柱设计、着陆控制、水平控制以及井眼轨迹控制的注意事项和轨迹控制技术应用;垂直旋转、套管开窗侧钻、分支井等几类特殊的钻井工艺技术等内容。

本书结合了生产实际,内容丰富、层次清楚、论述准确、理论联系实际,适应“工学结合”教学模式的需要,突出了职业教育特色,充分体现了现代科学技术与钻井技术相结合的发展水平,具有一定的科学性、系统性、完整性、针对性和实用性。

本书既可作为高职高专石油院校的学生教材,也可作从事石油钻井工作的职工培训及现场工程技术人员的参考书。

本书由渤海石油职业学院的王清江、毛建华、韩贵金和四川石油管理局川东钻探公司的曾明昌共同编著而成。绪论由韩贵金编写,第一章至第四章由王清江编写,第五章和第六章由毛建华编写,第七章由毛建华和韩贵金编写,第八章由曾明昌编写。王清江和毛建华完成了全书的统稿工作。在编写过程中得到了渤海钻探工程公司第二定向井分公司邵立中和吕志忠同志的大力支持,本书的插图工作由华北油田通信公司王子炫完成,在此一并表示感谢。

由于编写水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009 年 3 月

目 录

绪论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 定向井的应用范围	(2)
第三节 定向井的类型	(4)
第四节 定向钻井技术的发展	(6)
第一章 井眼轨道与井眼轨迹	(10)
第一节 井眼轨迹的基本概念	(10)
第二节 井眼轨迹图示法	(20)
第三节 定向井的相关概念及井眼轨道	(21)
第二章 井眼轨迹测量仪器及测斜计算	(29)
第一节 井眼轨迹测量仪器概述	(29)
第二节 测斜原理简介	(31)
第三节 几种典型的测量仪器简介	(38)
第四节 MWD 磁干扰的分析判断方法	(55)
第五节 井眼轨迹测斜计算方法	(57)
第三章 定向井专用工具	(66)
第一节 常规定向井工具	(66)
第二节 井底动力钻具	(73)
第三节 滑动钻进造斜工具	(88)
第四节 转盘钻进造斜工具	(93)
第五节 造斜工具造斜能力的预测	(101)
第四章 井眼轨迹预测与控制	(106)
第一节 井斜方位漂移	(107)
第二节 井眼轨迹预测与控制	(112)
第五章 常规定向井钻井技术	(118)
第一节 井眼方向控制方案设计	(118)
第二节 常规定向井施工准备	(125)
第三节 定向井直井段施工技术	(127)
第四节 定向井斜井段的施工技术	(129)

第五节	定向井施工中的复杂情况及注意事项	(143)
第六章	双驱复合导向钻井技术	(146)
第一节	双驱复合导向钻井技术的特点	(147)
第二节	双驱复合导向钻井中导向钻具的选型	(151)
第三节	导向钻具组合及其造斜特性分析	(156)
第四节	双驱钻井井眼轨迹控制技术应用	(157)
第七章	水平井钻井技术	(161)
第一节	几种基本类型水平井的工艺特点及水平井的应用领域	(162)
第二节	水平井的轨道设计及靶区参数	(165)
第三节	水平井井眼轨迹控制方案	(174)
第四节	水平井钻柱结构特点	(180)
第五节	水平井的着陆控制	(183)
第六节	水平井的水平控制	(190)
第七节	水平井井眼轨迹控制的注意事项	(200)
第八节	水平井井眼轨迹控制技术应用	(207)
第八章	特殊钻井工艺技术	(218)
第一节	垂直旋转钻井技术	(218)
第二节	套管开窗侧钻技术	(221)
第三节	分支井钻井工艺技术	(232)
第四节	丛式井钻井工艺技术	(236)
参考文献		(241)

绪 论

第一节 概 述

石油、天然气是由各种碳氢化合物及少量杂质组成的,存在于地下岩石孔隙、裂缝、溶洞中的可燃矿物。

石油钻探开发是高投入、高回报、高风险、技术密集、资金密集的行业,是以地质勘探资料为依据来设计开发目标,以地质条件、钻井目的、钻井技术水平为条件来设计井眼轨道,以钻井施工为手段形成油气流通道,以效益最大化为目的来发现和开采油气资源的系统工程。

石油钻井施工是石油钻探开发系统的一项子系统,它是按照一定的目的和要求,有控制地使井眼轨迹沿着预先设计的井眼轨道顺利钻达设计目标,并使效益最大化的施工工艺过程。根据石油钻井施工的过程,可把这个系统分为钻前工程、钻井工程、固井工程和完井工程四个子系统,系统程序如图 0-1 所示。在一口井的施工过程中,它们是不可或缺而又相对独立的系统。

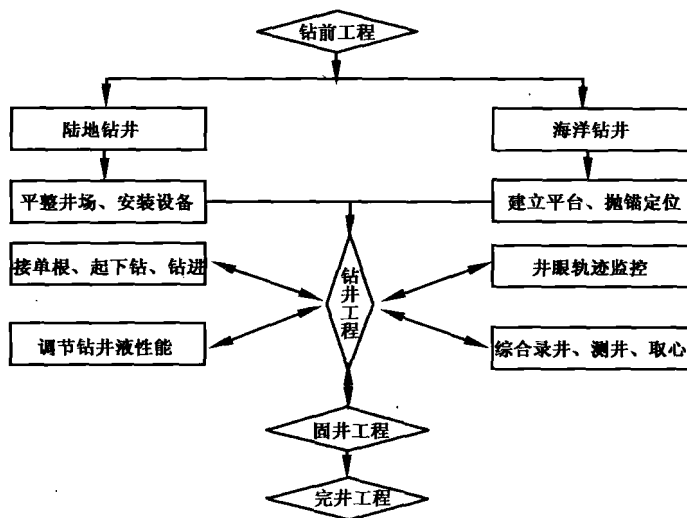


图 0-1 钻井施工程序框图

为达到石油钻探开发的目的和高效顺利的施工,在钻井施工过程中提出了必须遵守的原则和基本任务。钻井施工的原则是钻井施工必须服从地质要求,钻井施工基本任务是井眼轨迹控制、保持井壁稳定、提高机械钻速、保护油气层和钻井施工管理。

井眼轨迹控制是钻井施工钻达目的层的保证,保持井壁稳定是钻井施工顺利和高效实施的前提,提高机械钻速是降低钻井成本最有效的途径,保护油气层是钻井施工实现最终目标的要求,施工管理是保证钻井施工质量、安全、环保和健康的“守护神”。

此外,现代钻井施工,除了需要一套先进的钻机外,还需给钻头安上“方向盘”(在钻井施工过程中连续不断的控制井眼轨迹方向的井下专用工具,如弯外壳马达、旋转导向钻井系统)和“眼睛”(监测井眼轨迹方向的专用仪器,如 MWD、LWD),从而进一步拓展传统形式钻井施工的内涵。钻井施工内容如图 0-2 所示。

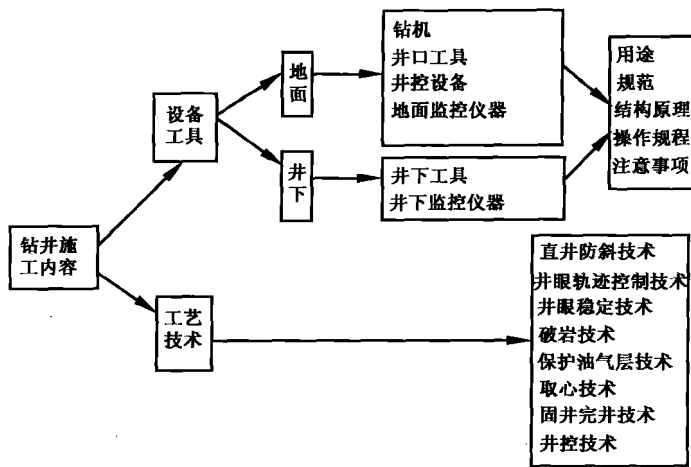


图 0-2 钻井施工内容框图

钻井技术基本分为两大类型,一种类型为井口与设计的目标在一条铅垂线上的直井,其钻井特点是在钻进过程中控制井眼轨迹与设计轨道(铅垂线)近似重合,即所谓的直井防斜技术(直井技术);另一种类型为井口与设计目标点不在一条铅垂线上而是按照人为的需要,在一个限定的方向上与井口垂线偏离一定距离的定向井。定向井的钻井特点是在施工过程中按照设计的井斜角和井斜方位角钻进,使井眼轨迹与设计轨道近似重合的钻井技术,即所谓的定向钻井技术。本教材将重点介绍定向钻井技术的相关知识。

第二节 定向井的应用范围

定向井的应用范围可以归纳为受地面环境条件限制、地下地质条件的要求、处理井下事故的特殊需要和提高经济效益的需要四个方面。

一、地面环境条件的限制

油气资源埋藏在高山、森林、城镇、重要建筑或沼泽之下,在地面上难以安装钻机或安装钻机和钻井作业费用高时通常需要考虑打定向井;油气资源埋藏在良田、草场等地下,为了少占耕地,需要考虑打定向井;油气资源埋藏在海洋、湖泊、盐田、河流、滩海等水域下,为了减少开发投资时,均需要打定向井,如图 0-3 所示。

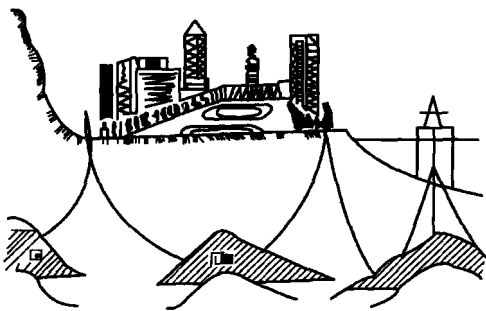


图 0-3 地面环境条件限制示意图

二、地下地质条件的要求

由于地质构造的特点,采用直井不能有效地勘探开发油气藏时,采用定向钻井技术往往能有利于发现油气藏或提高开发速度。如直井难以穿过的复杂岩层、盐丘、断层等地质层时常采用定向井更为经济,如图 0-4 所示。当钻遇陡构造、地层倾角太大时,或当定向井建井周期或钻井成本优于直井时,也常采用定向井。

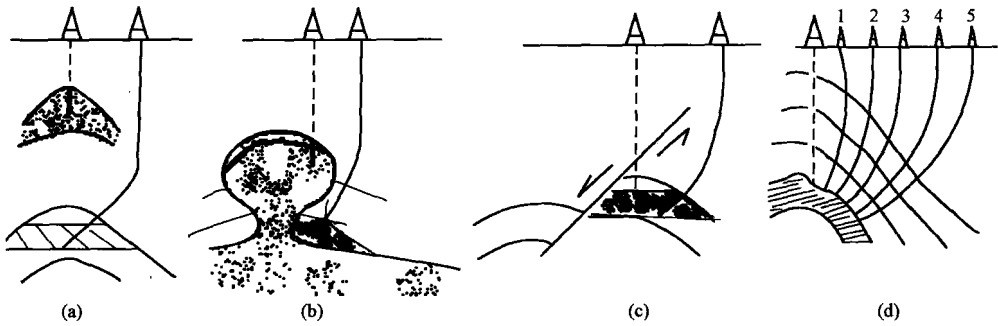


图 0-4 地质条件要求示意图

(a)复杂岩层;(b)盐丘;(c)断层;(d)陡构造

三、处理井下事故的特殊需要

遇到井下事故无法处理或不易处理时,常采用定向钻井技术。当井下落物或断钻具事故最终无法打捞时,可以从上部井段侧钻定向井,如图 0-5(a)所示;当遇到井喷着火且用常规方法难以处理时,在事故井附近钻定向井,也称救援井,将其与事故井贯通,进行引流或压井,从而处理井喷着火事故,如图 0-5(b)所示。

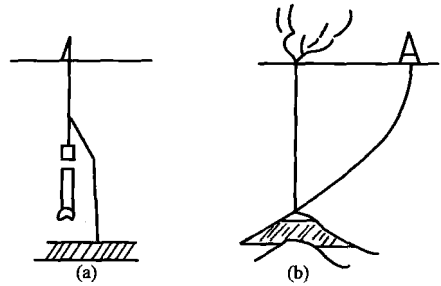


图 0-5 井下事故特殊需要

(a)侧钻井;(b)救援井

四、提高经济效益的需要

当原井钻探落空或钻遇油水边界、气顶时,可在原井眼内侧钻定向井;对于多层系或断层遮挡的油气藏,可用一口定向井钻穿多组油气藏;对于裂缝性油气藏、低压低渗稠油单斜油气藏,采用定向井可钻穿更多裂缝,最大限度地穿透产层,提高采收率。此外,采用定向水平井技术可以实现由点采到线采的突变,大幅度提高单井产量和采收率,并能有效地开发边际油气藏(用常规开采无工业价值、无经济效益的薄层、低渗、低产或海上小储量等油气藏),如图 0-6 所示;因受地貌、气候等条件的限制亦可用钻丛式井的方式来开采油气藏,以利于钻井施工、集输的保温和油井的管理(如南堡油田建的人工岛、二连地区冬季寒冷或沙漠地区),如图 0-7 所示。

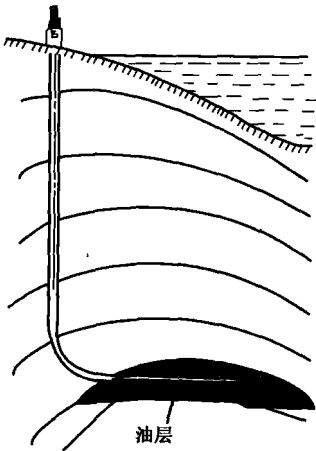


图 0-6 定向水平井示意图

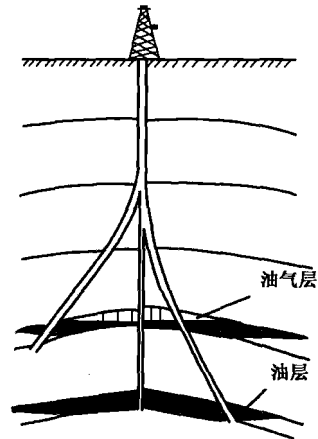


图 0-7 丛式井示意图

第三节 定向井的类型

定向井依据钻井的目的、钻井工艺技术及施工方法的不同,有多种分类标准。

一、按施工技术方法分类

1. 自然弯曲定向井

利用地层的自然造斜规律进行井眼轴线设计,在常规钻井施工过程中,只通过移动井位或改变井斜角、井斜方位角,必要时利用井斜控制理论辅以一般的增斜、降斜措施,即可按设计的井眼轴线钻达目的层的井,称为自然弯曲定向井,又称为初级定向井。

2. 人工弯曲定向井

采用造斜工具和技术措施克服地层自然造斜的影响,或者利用地层自然造斜规律与造斜工具相结合,使井眼轴线按设计的井眼轨道钻进、弯曲并钻达目的层的井,称为人工弯曲定向井,又称为受控定向井。

二、按设计井眼轴线形状分类

1. 二维平面定向井

井眼轴线形状只在某个铅垂平面上变化的定向井,称为二维平面定向井。二维平面定向井的井斜角是变化的,而井斜方位角是不变的,如图0-8(a)所示。

2. 三维定向井

设计井眼轴线可以在三维空间内,也可以在三维空间的某个倾斜平面上变化的定向井,称为三维定向井。三维定向井既有井斜角的变化,又有井斜方位角的变化,如图0-8(b)所示。

二维和三维定向井按井眼轨迹形式的不同又可分为曲线型、直线与曲线的组合型等多种形式,如图0-9所示。

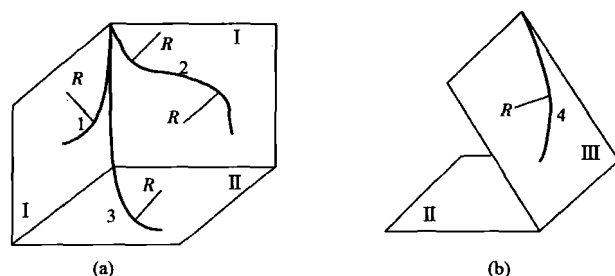


图0-8 二、三维定向井示意图

(a)垂直平面和水平面内的井眼轨道;(b)倾斜平面内的井眼轨道;

I—垂直平面;II—水平面;III—倾斜平面;

1—井斜角改变,方位角不变;2—井斜角改变,方位角不变和反方向改变;

3—井斜角不变,方位角改变;4—井斜角、方位角同时改变

三、按设计最大井斜角分类

1. 低斜度定向井

低斜度定向井设计井眼轨道中的最大井斜角不超过 15° ,此类井由于井斜角小,钻进时井斜方位不易控制,井眼轨迹控制难度较大。

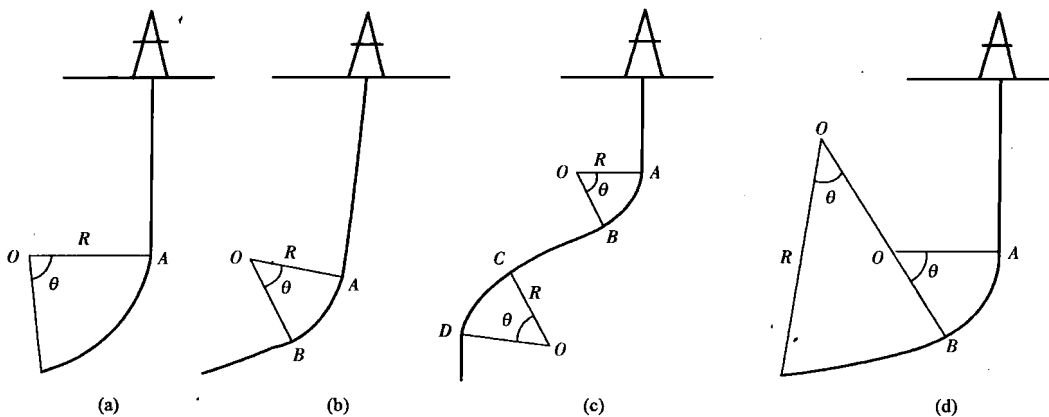


图 0-9 直线与曲线不同组合的井眼轴线示意图

(a)垂直线—曲线型;(b)斜直线—曲线—斜直线型;
(c)垂直线—曲线—斜直线—曲线—垂直线型;(d)垂直线—曲线—曲线型

2. 中斜度定向井

中斜度定向井设计井眼轨道中的最大井斜角在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 之间,此类井在钻进时井斜角、井斜方位角较易控制,井眼轨迹控制难度相对较小,是目前应用最多的一种定向井,又称常规定向井。

3. 大斜度定向井

大斜度定向井设计井眼轨道中的最大井斜角在 $46^\circ \sim 85^\circ$ 之间,井的斜度大、水平位移大增加了井眼轨迹控制的难度和钻井成本。

4. 水平井

水平井设计井眼轨道中的最大井斜角在 $86^\circ \sim 120^\circ$ 之间,此类井在井斜角达到设计要求后,还要沿近似水平方向钻进一定长度,如图 0-10 所示。水平井钻进难度相对较大,多数需要特殊设备、钻具、工具、仪器以及特殊工艺。

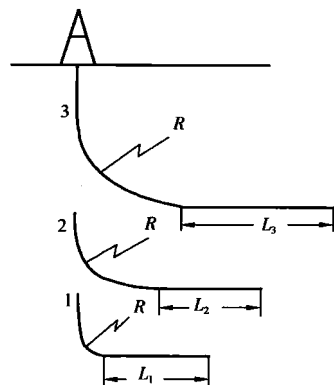


图 0-10 水平井示意图

1—短曲率半径水平井;2—中曲率半径水平井;3—长曲率半径水平井

四、按井底结构分类

1. 单底定向井

只有一个井底的定向井称为单底定向井。

2. 多底定向井(或井下分支定向井)

主干井(首先完成的井,又称主井)完成后,再从主干井内钻出其他分支井的定向井,称为多底定向井,又分为一级分支定向井和多级分支定向井。

1) 一级分支定向井

所有分支井均从主干井开始分支的井称为一级分支定向井。它又可分为:

(1)平面型一级分支定向井,图 0-11(a)、图 0-11(b)为单向(同向)羽状井,主干井倾斜或垂直开井,支井与其在同一方位;图 0-11(c)、图 0-11(d)、图 0-11(e)为双向羽状井,主干井垂直或倾斜,支井则与其方位相反。

(2)空间型一级分支井,主干井垂直或倾斜,支井在主干井上按照设计顺序向几个方向弯曲钻达预定目标的井,又称空间型集束井,如图 0-11(f)所示。

2) 多级分支定向井

主干井上有分支井,分支井上再钻分支井的定向井称为多级分支定向井。主干井和分支井可在一个平面上,如图 0-11(g)所示,也可在不同平面上。

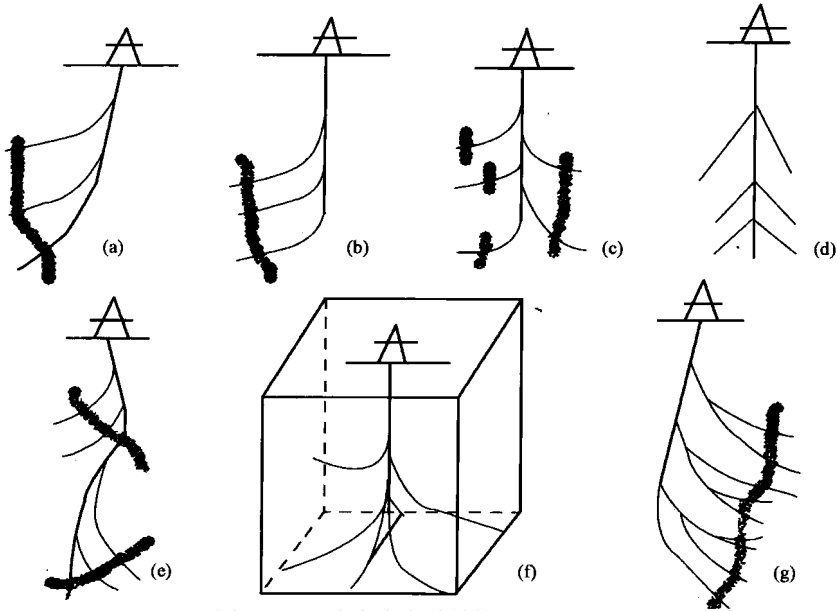


图 0-11 多底定向井结构分类示意图

(a) 主井倾斜的单向羽状井; (b) 主井垂直的单向羽状井; (c) 主井垂直的双向羽状井;
(d) 主井垂直的双向羽状井; (e) 支井不对称的双向羽状井; (f) 空间型集束井; (g) 多级分支定向井

五、按一个井场或一个钻井平台所钻井的口数分类

1. 单一定向井

在一个井位上只钻一个井眼的定向井称为单一定向井。

2. 双筒井

用一台钻机交叉作业,同时钻出井口相距很近的两口定向井称为双筒井。

3. 丛式井

凡在一个井场或一个平台上有计划地钻几口或几十口定向井,这些井统称为丛式井。

随着定向钻井技术的发展,定向井的种类还在不断增多。如:水平多底井、水平径向井、丛式水平井、连通井、大位移井和同层分支水平井等,使定向钻井技术得到了进一步的完善。

第四节 定向钻井技术的发展

20 世纪 20 年代末,人们意外地发现一口新钻的井钻穿了旁边老井的套管,虽然钻深不同,但都是同一个油层,于是认识到井是可以斜的。至 20 世纪 30 年代初,在海边向海里打定向井开采海上油田的尝试成功之后,定向井得以广泛的应用。

最早采用定向井钻井技术是在井下落物无法处理后的侧钻。美国在 20 世纪 30 年代初在加利福尼亚海岸的亨廷滩油田钻成了第一口定向井。

20 世纪 90 年代以来,钻井技术逐步细化为具有代表意义的水平井、多分支水平井、大位

移井、深井钻井、连续管钻井等钻井技术,并相继开发了许多新工具、新装备,增加和完善了钻井测试和控制手段、过程分析和控制软件。

国外定向钻井技术的发展简况(表 0-1)。

表 0-1 20 世纪国外定向井技术的发展简况

技术内容	50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代
轨道设计及轨迹计算方法	误差很大的正切法进行轨迹计算	曲率半径法、最小曲率法等多种轨迹计算方法	三维轨道设计及大组丛式井整体设计	开发了定向井设计和施工软件	大型集成设计软件包
轨迹控制理论与技术	斜直井段的二维分析	考虑井眼曲率影响,研究了多扶正器近钻头钻具组合(BHA)	三维受力分析由静态发展到动态	发展了多种分析方法并开发出了相应的软件	开始引入自动控制理论,开发了相关设备
定向造斜工具及工艺	涡轮钻具加弯接头斜向器配合转盘	螺杆动力钻具,专用工具的配套	涡轮、螺杆动力钻具向低速大扭矩发展,各种专用井下工具系列化	发展了复合式动力钻具,导向钻井系统,长寿命 PDC 钻头等	多分支井回接工艺、地质导向钻井系统成熟
测量工具	氢氟酸测斜仪和地面定向法	机械式罗盘测斜仪,精度较高的单、多点照相测斜仪	有线随钻测斜仪投入工业化使用	多种无线随钻测斜系统投入工业化使用	发展成熟带地质参数的无线随钻测斜仪

一、我国定向钻井技术的发展

我国定向钻井技术的发展可以分为三个阶段,20 世纪 50~60 年代开始起步;70 年代扩大实验,推广定向钻井技术;80 年代开始通过集团化联合技术攻关,使得我国的定向钻井技术有了重大发展。

(1)我国定向钻井技术始于 1956 年,当时在前苏联专家的帮助下,在玉门油田打了定向井、双筒井等;

(2)50 年代末,前苏联专家撤出后,60 年代我国依靠自己的力量,在四川打了许多高难度的定向井,而且还打了两口水平井,在当时名列世界第二位(第一位是前苏联);

(3)70 年代末到 80 年代初,在江汉油田、渤海油田以及胜利油田,打了一批小斜度定向井,为 80 年代中期定向钻井技术大发展作了铺垫工作;

(4)1985—1990 年,定向井、丛式井技术被列为“七五”国家重点攻关项目,取得了重大成果;

(5)1991—1995 年,水平井钻井技术被列为“八五”国家重点科技攻关项目,又取得重大成果,我国的定向井、水平井钻井技术达到了国际先进水平;

(6)1996—2000 年,侧钻水平井技术被列入国家“九五”重点攻关项目,侧钻技术和短半径水平井技术又有了重大发展;

(7)1997 年,我国南海东部公司依靠外国公司的技术,完成了一口大位移井(西江 24-3-A14 井),打破了当时的世界纪录。1999 年又完成了一口大位移井(西江 24-3-A17 井);

(8)自 2006 年起,中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)加大了水平井钻井工作力度,当年就完成了水平井 522 口,相当于前 6 年(2000—2005 年)完成水平井的总和,单井产量为同类直井的 3~5 倍,新建产能 $200 \times 10^4 \text{t}$,相当于打了 1900 多口直井。

水平井是中石油近年来推行的一种新技术,是实现“少井高产”的主要技术手段。南堡油田在钻井技术方面有了新的创新:一是利用人工岛实现了海油陆采;二是利用模块钻机配合井口槽技术实现了高密度丛式井的集中开发模式。我国能够独立完成的大位移钻井技术尚处在初级阶段,水平多底井、分支井、径向水平井等技术,正处在快速发展阶段。

二、21 世纪定向钻井技术的发展特征

1. 钻井工艺、技术、设备发展多样化

在多学科交叉的影响下,研发了大位移钻井技术、侧钻水平井钻井技术、分支井钻井技术、径向水平井技术、欠平衡钻井技术和连续油管钻井技术。研制了高技术含量的 MWD、LWD 等随钻测量仪器。

钻井井眼在水平方向上的位移已经突破 $1 \times 10^4 \text{m}$,使以前无法开采的复杂油气藏和老油田的储量得到开发,油气采收率显著提高,开发成本进一步降低。

钻井新技术的特点不仅体现在钻井工艺技术的多样性,还体现在井身结构、下部钻具组合、测试工具尺寸及功能上的多样化,这种多样化增强了钻井技术在不同条件、不同环境下的适应能力。

2. 工具和作业集成化、自动化、智能化

当前的导向钻具、测试工具和作业控制都日趋智能化,监控系统正由单一工具的智能化向整套系统智能化的方向发展。导向钻井技术从初级导向钻井、地面人工控制的导向钻井方式逐渐发展到全自动化的井下闭环旋转导向钻井方式。近年来,地面自动控制的导向钻井工具和随钻地层评价测试系统的成功开发,更体现了工具和作业智能化的趋势。

智能化钻井系统是自动化钻井的核心,是多种高新技术和产品进一步研发的结果,其微型化的发展趋势,可望在 21 世纪前半叶实现。

3. 钻井信息数字化

随着钻井过程中工具位置、状态、流体水力参数、地层特征参数的实时测试、传输、分析和控制指令的反馈、执行、再修正,钻井信息技术日益数字化,钻井过程逐步由人为的经验性监控过程发展成为一个可用数字描述的确定性监控过程。当前使用的三维成像技术就是钻井信息数字化的一个典型例证。

国际互联网和区域网络的互联,实现了井场数据与后方钻井、地质、油藏及管理部门间的双向通信,这样,在钻井过程中就能够及时获得后方的技术指导与支持,实现准确、优质、高效、安全地钻井。

4. 专业分工与作业合作化

自水平井钻井技术获得发展以来,出现了明显的专业分工和作业中的合作。目前这种合作化趋势更加明显。测试工具的开发和应用,多分支井完井管柱系统的开发,都体现了专业服务公司与作业者之间的专业分工和作业合作趋势。这种趋势有利于新技术、新工艺的研究和广泛应用。

总的来说,21 世纪定向钻井技术发展的趋势是向自动化、智能化、轻便化和经济化方向发展。尤其是水平井钻井技术正在向集成系统发展,即以提高成功率和综合经济效益为目的,结合地质、地球物理、油层物理和工程技术,对地质评价、油气藏筛选、水平井设计和施工进行综合优化。

水平井钻井技术的应用向综合应用方向发展,小井眼水平井钻井、横向多分支水平井钻

井、大位移水平井钻井等技术都已投入实际应用,采用的先进技术包括导向钻井系统、随钻测量系统、串接液马达、PDC 钻头和欠平衡钻井技术。

水平井钻井技术在这一背景下进入了一个新的发展时期,钻井技术的成熟和应用更丰富了这一变化,预计在本世纪初水平井钻井技术将完全进入科学钻井时代。

5. 自动化钻井的全过程

自动化钻井的全过程分为以下六个环节:

- (1) 地面实时测量,主要使用综合录井仪;
- (2) 井下随钻测量,目前主要用 MWD、LWD、FEWD 等仪器;
- (3) 数据实时采集,由相关计算机(井下或地面)来完成;
- (4) 数据综合解释并发出指令,采用人工智能优化钻井措施;
- (5) 地面操作自动化,由铁钻工、自动排管机完成;
- (6) 井下自动控制,实现井眼轨迹自动控制,由井下旋转导向系统完成。

在以上六个环节中,井下随钻测量和井下自动控制是关键环节,同时也是关键技术,二者结合起来实际上就是井眼轨迹自动控制技术(自动导向钻井技术)。

第一章 井眼轨道与井眼轨迹

井眼轨道是指一口井开钻之前,预先设计的井眼轴线的形状;井眼轨迹则是指一口井实际钻成后的井眼轴线的形状。无论是设计轨道还是实钻井眼轨迹都是一条连续光滑的空间曲线,如何准确、直观地描述出井眼轨迹的空间形态,同时又能体现出钻井施工的特点,是实现定向钻井施工的基础。

在定向井施工前,首先需要考虑地质条件、钻井目的的要求、钻井工艺技术和施工技术水平等的实际情况,设计出该井的井眼轨道,为钻井施工提供理论依据。在钻井施工过程中,需要随时掌握井眼轨迹的延伸情况,并与设计轨道进行对比,指导待钻井段的施工。对已完成井眼的井眼轨迹进行精确描述与评价,确定其是否符合设计要求。井眼轨迹的描述对于固井完井、修井作业、采油工艺设计和油田开发方案设计也是一份重要的基础资料。

井眼轨迹(轨道)描述的基础是以井口为原点建立坐标系,描述时既可以用图示法,也可以用解析法描述。这两种方法是相辅相成、互为补充的,应用时往往需二者兼顾,既利用图示法形象、直观的特点,又发挥解析法参数准确、灵活的优势。

第一节 井眼轨迹的基本概念

描述井眼轴线的形状及方位的参数可分为两大类,一类是监测参数,另一类是计算参数。

一、监测参数

由监测仪器在井眼轨迹每个测点上测得的井深、井斜角、井斜方位角统称为监测参数,也称为井身测量参数。

钻井中,实际钻出的井眼轴线是一条空间曲线,为了了解这条空间曲线的形状,就必须进行井眼轨迹的测量,这种轨迹测量,在钻井工程术语中称作测斜。目前,测斜的方法还做不到连续测量井眼轨迹,只能一个点一个点的测,被测的点称为测点,测点的标志是该点所在的井深。井深小的测点称为上测点,井深大的则称为下测点,两测点之间的长度称为测段。测斜仪器在每个测点上所测的参数有三个,即该点处的井深、井斜角和井斜方位角,这三个参数就是井眼轨迹的基本参数。

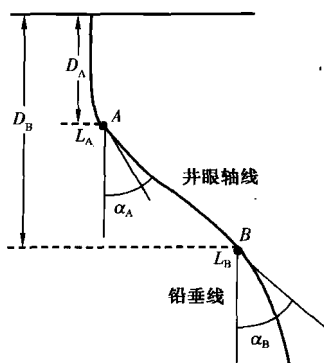


图 1-1 井斜角及垂深示意图

1. 井深(测深)

井深是指井口(通常以转盘面为基准)至测点的井眼长度,也称之为斜深、测深。井深是用钻柱或电缆的长度来计量的。井深既是井眼轨迹上某点的标志,又是该点处的井眼轨迹参数之一。

井深常用字母 L 表示,单位为 m 。井深的增量是用下测点的井深减去上测点的井深,井深的增量为井段,以 ΔL 表示。如图 1-1 所示, $\Delta L = L_B - L_A$ 。

2. 井斜角

井眼方向线与铅垂线之间的夹角就是井斜角。过井

眼轴线上某测点作井眼轴线的切线,该切线指向井眼前进方向的部分称为井眼方向线。显然,井眼方向线与铅垂线都是有向线段。井斜角表示了井眼轨迹在该测点处相对于重力线的倾斜程度。

井斜角常用 α 表示,单位为($^{\circ}$)。两个测点间井斜角的增量等于下测点的井斜角减去上测点的井斜角,用 $\Delta\alpha$ 表示。如图 1-1 中, A 点的井斜角为 α_A , B 点的井斜角为 α_B , AB 井段的井斜角增量 $\Delta\alpha = \alpha_B - \alpha_A$ 。

3. 井斜方位角

以正北方位线为始边,顺时针方向旋转到井眼方位线上所转过的角度,即为井斜方位角。某测点处的井眼方向线在水平面上的投影,称为井眼方位线或井斜方位线。正北方位线和井眼方位线都是有向线段,都可以用矢量表示。

井斜方位角常用 ϕ 表示,单位为($^{\circ}$)。规定:井斜方位角的值可以在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 范围内变化,顺时针为正,逆时针为负。井斜方位角的增量是用下测点的井斜方位角减去上测点的井斜方位角,用 $\Delta\phi$ 表示。如图 1-2 所示, A 点的井斜方位角为 ϕ_A , B 点的井斜方位角为 ϕ_B , AB 井段的井斜方位角增量 $\Delta\phi = \phi_B - \phi_A$ 。

井斜方位角还可用象限角表示,它是指井斜方位线与正北方位线或正南方位线之间的夹角,如图 1-3 所示,美国使用较多。象限角在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间变化,书写时需要注明所在的象限,如 $N67.5^{\circ}W$,表示方位在北偏西 67.5° 。

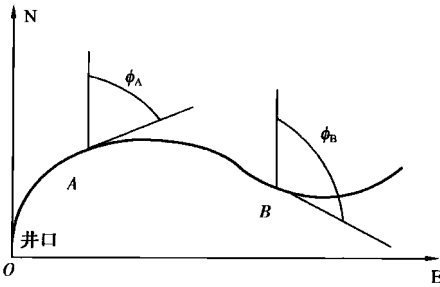


图 1-2 井斜方位角及井斜坐标示意图

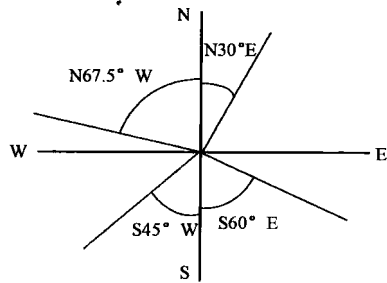


图 1-3 象限角示意图

井斜角和井斜方位角是相互依存的。只有井眼轨迹上某点的井斜角不为零时,才存在方位角,否则就不存在井眼轨迹的倾斜方位问题。因此,完整的“井斜”概念包含着井斜角和井斜方位角两层含义。

注意:“方位线”与“方向线”是有区别的。方位线是水平面上的矢量,而方向线则是空间的矢量。只要提到方位、方位线、方位角,都是指存在于某个水平面上;而方向和方向线则是存在于三维空间内(当 $\alpha = 90^{\circ}$ 时,二者均在水平面上)。井眼方向线是指井眼沿轴线上某一点处井眼前进的方向线。该点的井眼方位线则指该点井眼方向线在水平面上的投影。在学习扭方位计算时,也要特别注意这个区别。

4. 井斜方位角基准变换

在石油钻井施工的井眼轨迹监测中,由于采用了不同正北方向的基准,所以定义了三种方位角,即真方位角、磁方位角和坐标方位角。

1) 基本概念

磁性测斜仪所测得的井斜方位角,是以地球磁北方位为基准的,称为磁方位角。地磁极与