

定向钻井 设计与计算

第二版

Design and Calculation
of Directional Drilling

■ 韩志勇 编著

中国石油大学出版社

定向钻井

设计与计算

(第二版)

韩志勇 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

定向钻井设计与计算/韩志勇编著. —2版. —东营:中国石油大学出版社, 2007. 10
ISBN 978-7-5636-2304-4

I. 定… II. 韩… III. ①定向井—钻井—设计 ②定向井—钻井—计算 IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 153721 号

书 名: 定向钻井设计与计算(第二版)
作 者: 韩志勇

责任编辑: 高 颖 (电话 0546—8393394)
封面设计: 王凌波

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com
排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心
印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791, 8392563)
开 本: 180×235 印张: 21.75 字数: 424 千字
版 次: 2007 年 11 月第 2 版第 1 次印刷
定 价: 43.00 元

内 容 提 要

本书共分3章。第一章从定向井轨迹的基本概念讲起,详细地介绍了定向井轨迹的测斜计算、轨迹的内插与外推、轨迹的质量评价以及轨迹的绘图等的主要方法和计算公式。第二章介绍了定向井井眼轨道设计,给出了9种类型的定向井轨道设计的思路、方法和整套设计计算公式。第三章介绍了定向井轨迹控制原理和计算,在讲述造斜工具及其造斜原理和轨迹控制的基本方法之后,详细介绍了斜面法扭方位和柱面法扭方位的概念和特点,给出了两种扭方位方法详细的实用计算公式,并指出了公式在使用中存在的问题和注意事项。

与作者20年前出版的第一版《定向井设计与计算》相比,本书删去了一些落后和过时的内容,增加了大量新的内容,反映了近20年来定向钻井技术理论发展的新成果。

本书可作为石油大专院校石油工程专业学生的选修课教材和定向钻井工程技术人员的培训教材,也可供从事石油工程和地质钻探工程技术人员参考。

第二版前言

第一版前言讲述了本书初版的编写过程,其手稿于1987年8月脱稿后,至今已整整20年了。20年来,对初版书进行增订的必要性和迫切性在不断增长。

一方面,这20年来,国内外定向钻井实践和理论技术都有了巨大的发展。从1985年到2000年,作者参与了三个五年计划的国家重大科技攻关项目:定向井、丛式井钻井配套技术研究,水平井钻采配套技术研究和侧钻水平井钻井配套技术研究。在这期间,作者通过学习、研究,在完成国家攻关项目的同时,积累了一些新的研究成果。虽然作者每年都举办若干次定向钻井技术培训班,但学员人数毕竟有限,而且第一版书作为教材,已经不适用了。在教学中,不断有人建议对第一版书进行修订,增加新的内容。

另一方面,第一版书于1989年12月印刷出版后,成为我国定向钻井工作者的启蒙教材,对我国定向钻井技术的发展起到了一定的推动作用,受到读者的好评。但是,由于印刷量较少,1992年初就完全脱销。十几年来,不断有读者因买不到书而直接打来电话询问,或打电话催促修订本的编写和出版。这些情况都增加了作者的责任感和紧迫感,并给了作者信心和力量。

本书的编写,虽基本上保持了第一版的结构体系,但内容上有很大的变化:

(1) 保留第一版书中仍然有用的内容,但都根据技术的发展和新的理解认识,进行了改写或重写。

(2) 删去第一版书中已经过时的落后内容。主要删去的内容有:① 井眼轨道设计的“作图法”和“查图法(图版法)”及附录中的图版,只保留解析法;② 方位控制计算中的“方位扭转角的计算”部分;③ 斜面法设计三维定向井中的坐标转换法,改用

更简单的设计方法。

(3) 改正第一版书中的错误内容。第一版书中除了大量印刷错误外,内容上的主要错误是在资料反算法确定反扭角的例题(300页)中使用了两个公式:

$$\omega = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_2 \sin \Delta\phi}{\sin \gamma}\right)$$

和

$$\omega = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_2 \sin \Delta\phi}{\sin \gamma}\right)$$

关于错误的原因,本书中已经给出了详细说明。

(4) 增加大量新的内容。① 关于轨迹计算方面,新增加的内容有:井斜方位角的校正、井眼轨迹的内插与外推、井眼轨迹的质量评价、轨迹的绘图。特别是在井斜方位角校正部分,增加了子午线收敛角和磁偏角的计算方法。② 关于轨道设计方面有:水平井轨道设计、大位移井轨道设计、考虑方位漂移的轨道设计、三维多目标井轨道设计。这些都是第一版中没有的。另外,待钻井眼轨道设计中还增加了更多的新内容。③ 关于轨迹控制计算方面有:造斜工具及其造斜原理介绍、轨迹控制基本方法介绍、斜面法扭方位的“恒斜面倾角模式”、柱面法扭方位中用于圆柱螺线和自然参数曲线的扭方位监控新模式探讨等。

本书中新增的内容和修改的内容,虽然多数已在近年来的定向钻井技术培训班中介绍过,但只有一部分以论文形式公开发表过,相当多的内容是在本书中首次发表的。

本书新增的内容,主要是作者及其同事的研究成果,也少量引进了国内一些学者,包括刘修善、唐雪平、鲁港等公开发表的研究成果。

本书在编写过程中,为了对读者负责,特别注意贯彻两个原则:其一是所有的计算方法和计算公式,力求准确和实用,并提醒读者在使用中可能存在的问题和处理方法;其二是原理、理论和方法等内容的叙述,力求通俗易懂,尽可能使用初等数学表达。另外,凡引用或参考了别人的研究成果,都尽可能给予说明或用参考文献标注。

为了便于编写,也便于读者查阅,本书中的图、表、公式和参考文献,均按照“章节”编号。每节的参考文献列在该节内容的后面。

在本书内容的研究过程和编写过程中,受到许多人的帮助。在本书第二版出版之际,我要首先感谢我的老师刘希圣教授,是他带领和指引我参加了三个五年计划的国家重点科技攻关项目,使我从中得到锻炼和提高,才有对定向钻井技术的进一步理解和深化。

还要感谢我的同事宁秀旭、范瑾、聂翠平、黄根炉、马善洲、张建国、崔红英等,他们虽然都曾经是我的学生,但在参加科研项目攻关和教学的长期工作中,一起研究和

解决问题,给了我很大的帮助和启发,本书中很多内容也凝聚着他们的智慧和心血。特别感谢黄根炉同志,他编写了计算机程序,对一些较复杂的计算部分(如子午线收敛角和国际地磁模型的计算、三维多目标井轨道设计等)的公式进行了验证,消除了一些错误和疏漏。

此外,还要感谢曾经参加过我的“定向钻井技术培训班”的学员们。20余年来共举办过近30期定向钻井技术培训班或学习班,学员中的许多人来自定向钻井现场,和他们相互交流,相互学习,教学相长。有时他们提出的一个问题,会对我有所启发,从而发现新的问题,进一步研究提高。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)“211工程”学术著作基金的资助,在此表示感谢。

本书的书名为《定向钻井设计与计算》,与第一版书名稍有差别。

谨以此书献给我国的定向钻井事业。

韩志勇

2007年6月

第一版前言

由于教学的需要,作者曾于20世纪70年代初收集了一些定向钻井方面的资料,对一些公式进行了推导、证明和校正,并且研究了定向井剖面设计的解析方法。1975年,编写了一本名为《定向斜井》的教材,后被纳入《钻井专题教材》(华东石油学院,1976年3月重印本)。1983年初,作者应约编写一本适合于定向钻井工程技术人员使用的书,并于当年8月写成初稿,定名为《定向井设计与计算》。

初稿油印出来以后,石油工业部勘探开发技术培训中心于1984年和1985年举办的四期定向井工程师培训班,皆以此初稿为教材。通过在培训班授课、与现场工程技术人员共同研究和讨论,收到了教、学相长的效果。在此基础上,1986年对初稿进行了修改,仍为油印本,又在两期定向井培训班上使用。在此期间,还以油印本的内容,分别在胜利油田和中原油田举办过定向井培训班。另外,初稿的部分内容还被作为石油学院钻井专业课的教学内容并被编入高等学校教学用书《钻井工艺原理》中。1987年,对初稿又作了进一步修改,增加了少量新内容,成为本书。

本书的内容大体上来源于三个方面:

- (1) 国内外已发表的有关文章的汇编,如各种测斜计算方法等。
- (2) 在美国 Eastman Whipstock Inc. 学习的有关内容,如方位扭转角的计算、查图法设计二维定向井、定向钻井计算尺(Ouija Board)的使用等。
- (3) 近几年的有关研究成果,如二维定向井各种剖面的解析法公式、三维定向井的设计方法和计算公式(与宁秀旭同志合作)、造斜工具装置角的计算公式、动力钻具反扭角的资料反算法等。

在本书的编写过程中,来自各油田的工程技术人员给予了很大的支持和启发,在教学中与他们共同讨论,确实受益匪浅,在此向他们表示衷心的感谢。在作者对本书许多问题的研究过程中和教学实践中,还受到了华东石油学院刘希圣教授以及宁秀旭、聂翠平等同志的大力支持和帮助,在此特表谢意。

作者

1987年8月

目 录

绪论	1
第一章 定向井的轨迹计算和轨迹绘图	5
第一节 定向井轨迹的基本概念	5
第二节 井斜方位角的校正	23
第三节 定向井轨迹的测斜计算	48
第四节 定向井轨迹的内插与外推	72
第五节 定向井轨迹的质量评价	87
第六节 定向井轨迹的绘图	95
第二章 定向井井眼轨道设计	111
第一节 概述	111
第二节 常规二维定向井轨道设计	118
第三节 多增降率轨道设计	129
第四节 缓曲稳轨道设计	135
第五节 水平井轨道设计	141
第六节 大位移井轨道设计	149
第七节 三维绕障定向井轨道设计	174
第八节 考虑方位漂移的定向井轨道设计	183
第九节 三维多目标井轨道设计	192
第十节 待钻井段的轨道设计	220

第三章 定向井轨迹控制原理和计算.....	246
第一节 造斜工具及其造斜原理.....	246
第二节 定向井轨迹控制的基本方法.....	272
第三节 斜面法扭方位的计算.....	285
第四节 柱面法扭方位的计算.....	321
后记.....	336

绪 论

定向井是指按照预先设计的井斜方位和井眼的轴线形状进行钻进的井,或者说,凡是设计目标偏离井口所在铅垂线的井都属于定向井。定向井是相对于直井而言的,并且是以设计的井眼轴线为根据区分的。直井的井斜角为零度,没有井斜方位角。尽管实钻的直井都有一定的井斜角,甚至有的井斜角很大,但仍然属于直井。定向井又可分为二维定向井和三维定向井,也是以设计的井眼轴线形状为根据划分的。凡是井眼形状只在某个铅垂平面上变化的定向井,都称为二维定向井,它们的井斜角是变化的,而井斜方位角是不变的。三维定向井则既有井斜角的变化,又有井斜方位角的变化。实钻的二维定向井井眼轨迹虽然都既有井斜角的变化,又有井斜方位角的变化,但仍然属于二维定向井。

定向井在石油勘探与开发中得到了广泛的应用。在地面上难以建立井场和安装钻井设备进行钻井的地区,要勘探开发地下的油气资源,唯一的办法就是从该地区附近打定向井。在海洋或湖泊等水域上勘探开发石油,最好是建立固定平台,或采用移动式钻井平台,或从岸边打定向井、丛式定向井。当在钻达油气层所经过的地层中有难以穿过的复杂地层时,用定向井可以绕过这些复杂地层,称为绕障定向井。在发生断钻、卡钻以及井喷着火等恶性事故的情况下,采用侧钻井、救援井是处理此类事故的有效方法。近年来,各类水平井、大位移井、多分支井和三维多目标井的出现和发展,更是把定向井的应用推进到了优化油藏开发方案,增加产量,提高采收率的范围。另外,在非石油勘探开发领域,例如煤层气、卤水、地热、天然气水合物、固体矿产等的勘探和开采,以及地下核试验的采样等,定向钻井技术也有着非常广泛的应用。

定向钻井技术首创于1932年,当时美国加利福尼亚海岸上的陆上油田追踪到海里,为了开采海上油田,采用了在岸上钻定向井的方法。70多年后的今天,定向钻井



已经遍及全世界,成为石油勘探开发最重要的技术手段。

我国的定向钻井技术始于 1956 年,当时在前苏联专家的帮助下,在玉门油田打了一批定向井。20 世纪 60 年代,在前苏联专家撤离后,我国完全依靠自己的力量,在四川钻出了许多高难度的定向井和水平井,曾达到相当高的水平,与当时世界先进水平的差距并不大。在当时,我国是世界上第二个钻成水平井的国家。但在 20 世纪 60 年代中期以后,我们与世界先进水平的差距拉大了。70 年代到 80 年代初期,在江汉、胜利和渤海等油田,定向钻井仍在继续,钻了一批小斜度定向井。从 1985 年到 2000 年的 15 年,我国连续三个五年计划,集中了国内大油田、石油高校和研究院所的力量,对定向井、丛式井、水平井和侧钻水平井等关键技术进行了重点攻关,取得了极其显著的成果,大大缩短了与世界先进水平的差距。期间,我国海上油田发挥对外合作的优势,在大位移井技术方面也取得了重大突破,1997 年创造了大位移井的几项世界纪录。进入新世纪以来,我国的定向钻井事业正面临着新的发展机遇。

20 世纪 80 年代以来的 20 多年,是国内外定向钻井技术高速发展的时期。在该时期,起主导作用的是硬件的发展:在测量仪器方面,使用了磁通门和加速度计,出现了电子测量仪和随钻测量仪;在造斜工具方面,开始出现了由弯外壳螺杆钻具组成的滑动导向钻井系统,进而出现了多种形式的旋转导向钻井系统,从而显著地提高了定向钻井的技术水平,大大提高了定向钻井的质量、速度和效益。

目前,我国定向钻井技术与国外先进水平的差距也主要在于硬件方面。应该说,在定向钻井技术的理论研究方面,我们并不落后,甚至在某些方面是领先的。我国学者在定向钻井的理论研究方面,做出过重要的贡献,值得提出的有:

郑基英教授在 20 世纪 60 年代初期曾推导了斜向器和弯接头两类造斜工具装置角的部分计算公式,在 70 年代提出了井身计算的圆柱螺线法和校正平均角法,在我国定向井的理论研究方面做了开创性的工作。

白家祉教授和苏义脑院士把纵横弯曲连续梁理论应用于井底钻具组合的力学分析,在世界上众多研究井底钻具组合的方法中独树一帜;苏义脑院士创立了“井下控制工程学”,在导向钻井理论和实践方面做出了重大贡献。

刘修善教授提出的自然参数曲线,既可作为轨迹计算的一种方法,又可用于考虑方位漂移的井眼轨道设计曲线,在用解析法设计考虑方位漂移轨道方面具有明显的优点。

还有一位近年来初露锋芒的年轻学者鲁港先生,一开始便显示出他深厚的数学功底,对定向井轨迹曲线方程的求解和邻井距离计算方面,给出了简单而又实用的计算模型。

本书作者及其同事在定向井轨迹计算、轨道设计和轨迹控制等方面,较早地进行了系统的理论研究,推导和验证了有关的计算公式,建立了定向井设计与计算的理论

体系,首先提出了定向井轨道设计的解析方法、恒装置角柱面法扭方位模式、适用于斜面圆弧轨道的恒斜面倾角扭方位模式等,举办了近 30 期定向钻井技术培训班,为我国定向钻井事业的发展做出了较大的贡献。

借本书第二版出版之际,我们来大胆地预测一下未来定向钻井技术的发展前景和发展趋势。

(1) 油气资源供应的紧缺形势和目前油气生产遇到的问题,为定向钻井技术提供了广阔的发展空间。

目前油气开发遇到的主要问题可概括为 3 个方面:一是新老油田如何提高采收率,新油田如何优化布井方案,老油田如何开采出更多的剩余油;二是海上油田如何开发更能降低成本,提高产量;三是一大批低渗油藏、稠油油藏、裂缝油藏、薄油藏、边际油藏等特殊油藏如何开发更为有效。定向钻井技术在解决这些问题中都是大有可为的。

(2) 中靶精度和轨迹符合率将大大提高。轨道设计曲线、轨迹控制模式和轨迹计算方法,将趋向于三者高度统一。

造斜工具和随钻测量、随钻定向技术的发展,已经大大提高了中靶精度和轨迹符合率。在未来的发展中,轨迹符合率必将列为定向井轨迹质量的重要评定项目。轨迹符合率高,意味着轨迹优化,有利于采油作业。目前轨道设计曲线可以有 4 种,但是轨迹控制模式却只有一种“恒装置角模式”,理论上只能钻出恒装置角曲线,无法准确钻出其他 3 种曲线设计的轨道。轨迹符合率的进一步提高,必然要求轨迹控制模式与轨道设计曲线的高度统一。

(3) 未来定向钻井工作的重心将由靶前井段向靶区井段转移。工作重心的转移,有可能引出新的定向井类型。

目前的定向钻井工作主要集中在靶前井段,重点是既要打得快、打得好,还要准确中靶。除了水平井以外,靶区井段都比较短,没有多少工作量和难度。但是从发展趋势看,水平井、多分支井和三维多目标井等出现后,意味着进入靶区以后,轨迹在靶区的延伸、发展和布置越来越受到重视。特别是三维多目标井,国外称为“Designer Wells”,国内根据其轨迹特点翻译为“三维多目标井”并不完全恰当。因为“Designer Wells”所体现的重要设计思想没有被翻译出来。实际上,“Designer Wells”的出现,表明靶区井段在油藏开发中的重要性,设计者将更多地考虑轨迹在靶区内的延伸、变化和发展,从而优化开发方案,提高产量和采收率。一个新油藏的开发,利用多种轨迹类型的定向井优化开发方案,这种发展趋势在论文(SPE 92085)中已初现端倪。顺着这个趋势,未来很有可能出现一种完全适应于设计者意愿的新型定向井。

(4) 随钻技术和导向钻井技术的发展,最终将被引导到提高采收率的方向,可能会出现剩余油导向钻井技术。



目前正在发展的各种随钻技术(随钻测量、随钻测井、随钻地层评价、随钻地震等)和各种导向(轨迹导向、地质导向等)钻井技术,一方面极大地提高了轨迹控制能力;另一方面使得井下信息的实时获得量大大增加,极大地提高了地下的透明度。考虑到老油田剩余油的开采有着巨大的潜力和吸引力,随钻技术和导向钻井技术必然会向着开发剩余油的方向努力,利用某种原理,引导钻头向着剩余油富集的位置和方向钻进。

定向钻井技术在石油勘探开发中已经发挥了重大作用,今后还将发挥更大的作用。

第一章 定向井的轨迹计算和轨迹绘图

井眼轨迹计算和轨迹绘图是非常必要的。首先,根据轨迹计算的结果,可以知道已钻井眼的形状。与原设计的井眼形状对比,可以知道已钻井眼是否符合设计要求,从而指导待钻井眼的施工,及时调整井斜角和井斜方位角,以便准确钻达目标点。其次,一口井井眼轨迹的形状及其坐标位置本身就是一项重要的资料,对于继续钻进和以后的固井、完井、试油、采油、修井,以及油田开发过程中加密井、调整井的布置和钻进,都是必不可少的资料。

在介绍测斜计算方法以前,需要先介绍有关定向井轨迹的一些基本概念。

第一节 定向井轨迹的基本概念^[1]

本节主要介绍各种井身参数的基本概念和它们之间的相互关系。这些基本概念对于以后的设计计算是至关重要的。

一、轨迹基本参数

轨迹基本参数,也有人称之为井身基本要素。

实际钻出的井眼轴线都是一条空间曲线。为了了解这条空间曲线的形状,需要先进行轨迹测量,这种测量称为“测斜(survey)”。目前的测斜方法还做不到连续测斜,实际上是一个点一个点地测。被测的点称为测点。测点的标志是该点所在的井深和相邻两测点间的井段长度(称为测段)。

在每个测点上测量所取得的测斜数据有 3 项,即该点处的井深、井斜角和井斜方位角。这 3 项参数就是井身轨迹的基本参数。井身的其他参数都是根据基本参数推导或计算出来的。

(1) 井深:指井口至测点间的井眼长度,也有人称之为斜深,国外称为测量井深(measure depth)。井深通常是以钻柱长度或电缆长度来测量的。井深既是测点的标志,又是该测点处的基本参数。

实际上,测斜仪器并不是一个点,它是有一段长度的。测点的井深是以测斜仪器中的测角装置(angle unit)所在的井深为准的。

井深常以字母 L 表示,单位为 m。

(2) 井斜角:某测点的井斜角等于该测点处的井眼方向线与重力线之间的夹角。井眼方向是指钻头钻至该点时的前进方向。井眼方向线与重力线都是有向线段。

井斜角通常以希腊字母 α 表示,单位为度($^{\circ}$)。如图 1-1-1 所示,A 点的井斜角为 α_A ,B 点的井斜角为 α_B 。

(3) 井斜方位角:是指以正北方位线为始边,顺时针旋转至井斜方位线所转过的角度。井斜方位线是指该测点处的井眼方向线在水平面上的投影线。正北方位线是沿着该测点处的地理子午线向正北方向延伸的线段。正北又称为“真北(true north)”。正北方位线和井斜方位线都是有向线段。请注意,本书中凡讲到方位线,都是指在水平面上,而方向线则泛指在三维空间内。

井斜方位角通常以字母 ϕ 表示,单位为度($^{\circ}$)。如图 1-1-2 所示,A,B 两测点的井斜方位角分别为 ϕ_A, ϕ_B 。井斜方位角的值可以在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间变化。

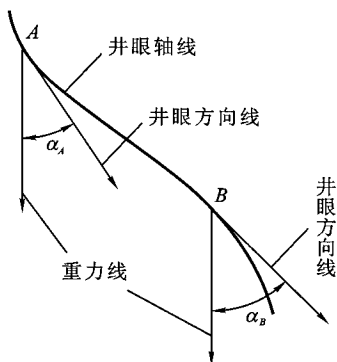


图 1-1-1 井斜角示意图

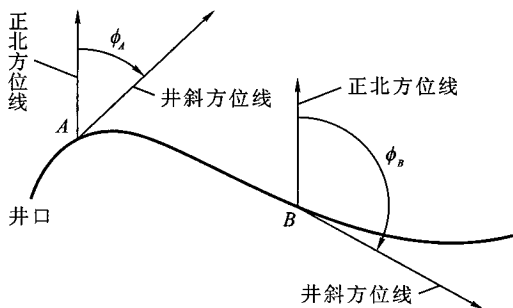


图 1-1-2 井斜方位角示意图

美国等西方国家表示井斜方位角通常使用象限角,在 I, IV 象限,用井斜方位线与正北方位线之间的夹角表示;在 II, III 象限,用井斜方位线与正南方位线之间的夹角表示。象限角的值在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间变化,并用方位字母注明象限,如图 1-1-3 所示。

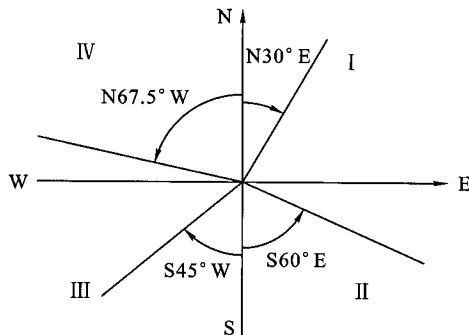


图 1-1-3 井斜方位角的象限值表示