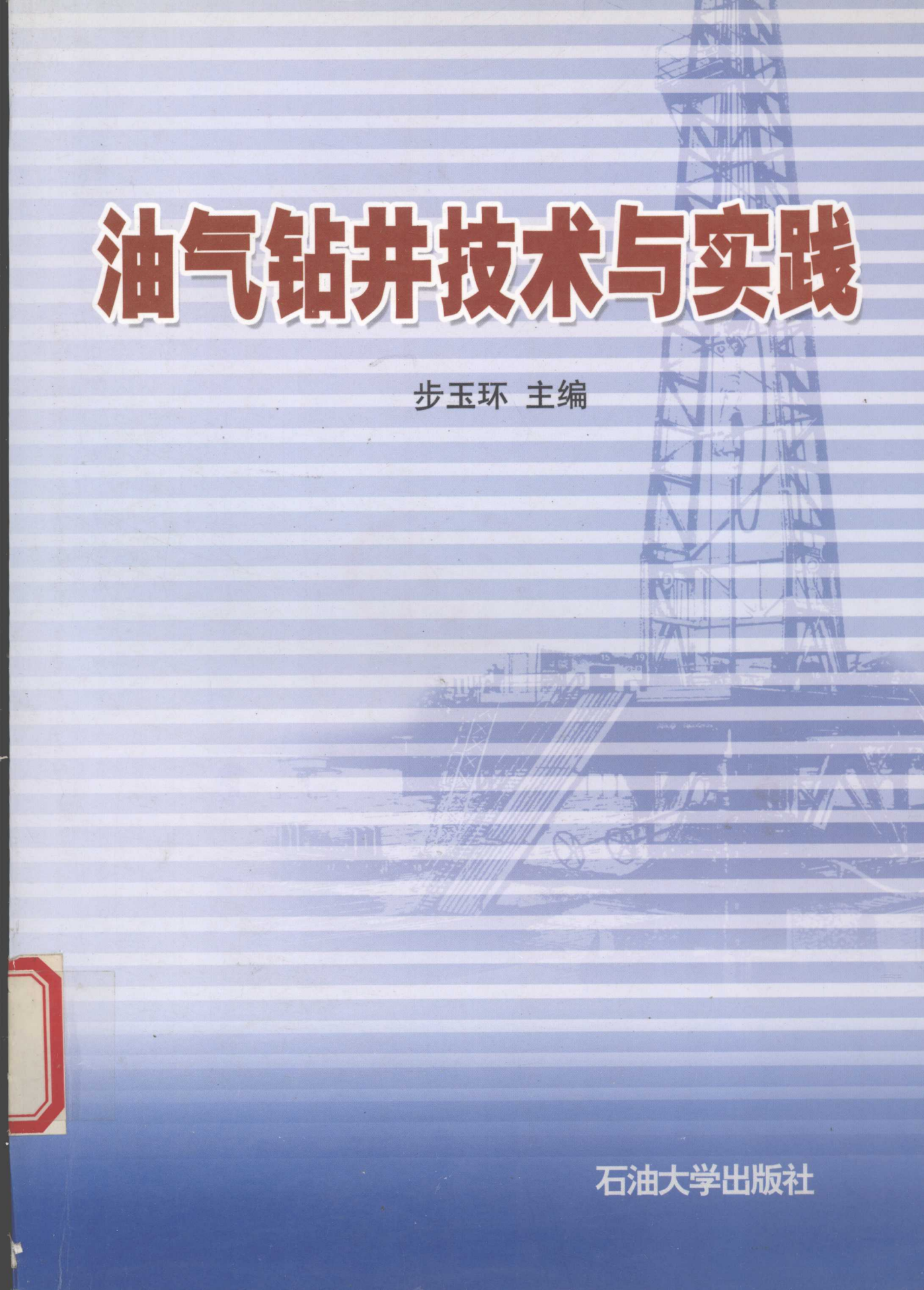


油气钻井技术与实践

The background of the cover features a detailed, blue-toned illustration of an oil drilling rig. The rig's derrick is the central focus, with various structural beams and platforms visible. Below the derrick, there are smaller structures and equipment, including what appears to be a pumpjack or similar machinery. The entire scene is set against a light blue background with horizontal stripes.

步玉环 主编

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油气钻井技术与实践/步玉环主编. —东营:石油大学出版社, 2003. 4

ISBN 7-5636-1761-2

I. 油… II. 步… III. 油气钻井-文集
IV. TE2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 027143 号

书名:油气钻井技术与实践

作者:步玉环

责任编辑:陆丽凤

封面设计:孟卫东

出版者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com>

印刷者:石油大学印刷厂

发行者:石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.25 字数: 500 千字

版 次: 2003 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—300 册

定 价: 50.00 元

前 言

当今世界，科学技术已成为经济和社会发展的主要推动力。随着人类知识的不断积累和科学技术基础的日益雄厚，科学技术的发展越来越快。胜利石油管理局钻井行业的青年工作者以提高我国钻井技术水平为己任，贴近生产、积极创新、勇于实践。通过在实践中研究和探索，取得了许多可喜的成果和宝贵的实践认识。为了促进钻井技术的发展、提高现场实践水平，这批年轻的工作者撰写了许多科技论文，从中筛选出 80 余篇汇编成这本论文集。

该论文集主要包括：钻井工艺技术、钻井液技术、固井完井技术、井下测量技术、钻头的研究与使用、提高机械钻速、钻井事故预防及处理等内容。我们期望其中的一些论文对现场的优、快钻井实践有些参考价值，对科研攻关有些指导作用。当然，论文集的出版也是对这批工作在钻井行业一线的工作者的鼓励和鞭策，期望将来能奉献出更多、水平更高的论文。

由于水平和经验不足，遗漏和不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者

2003 年 3 月

目 录

钻井工艺技术

导向组合复合钻进的几个问题及影响导向力的因素	王敏生	燕修良(1)
定向井三维轨道的选择和设计		解巧云(6)
乐安油田草古 100 区块水平井钻井技术		房绍光(15)
小井眼定向开窗侧钻轨迹控制技术的现场应用		牟善波(18)
胜利油田调整井钻井技术	于海平	陈小林(22)
川西地区中深定向井钻井技术实践	艾中华	王敏生(25)
狮 23-X1 井侧钻定向工艺技术		范兆祥(29)
富台油田小井眼钻井技术应用		刘会斌(33)
济阳坳陷构造直井井身轨迹控制技术		焦淑双(36)
埕北西 A 井组浅表层预定向技术		李士清(40)
滑动导向钻具组合钻井技术及其应用	刘 虎	杨世杰(43)
滨 425—平 1 井欠平衡压力钻井技术	刘全江	李佩武(47)
大位移井钻井技术		王才学(50)
草桥丛式水平井钻井技术	杨 鹏	王敏生(53)
偏重钻具防斜机理分析及应用		周爱照(58)
卡塔尔杜汉油田水平井轨迹控制技术		房绍光(61)
蒙古国摩哥 1 井钻井施工实践	于海平	陈小林(65)
采用欠平衡钻井技术有效开发低渗透油藏	燕修良	王敏生(71)
小井眼井水力参数现场评价及优选	刘会斌	高志强(75)
胜利油田分支水平井方案设计	王敏生	李 庆(80)
坨 71-斜 14 井套管锻铣技术		许军富(86)

钻井液技术

聚乙二醇抑制性影响因素分析	韩立国	吕开河(88)
正电性不分散钻井液体系的室内研究		周 辉(92)
水平井完井过程中钻井液损害地层的因素分析		孙胜松(96)
胜利油田坨一胜一永断裂带高密度深井钻井液技术		薛立国(100)
水平井单 56—平 1 井钻井液技术		柴金鹏(106)
钻井液泥饼压缩性评价方法研究		郭宝民(110)
不同钻井液体系的特性分析		孙胜松(118)
钻探古潜山地层钻井液技术	王才学	吴水华(123)
泥页岩稳定性评价方法及相关性分析	韩立国	吕开河(127)
聚乙二醇钻井液在雪古-1 井的应用		张令存(131)
一醇二磺钻井液在欠平衡井中的成功应用		薛立国(135)
埃及东部沙漠钻井及泥浆技术	杨世杰	焦淑双(140)

SAPO 型钻井液添加剂提高钻速试验研究——黄传常 刘 准 罗晓军(146)

固井完井技术

胜利海上长裸眼固井技术	栾淑文(149)
大位移井下套管工艺技术	王君书(152)
对提高固井质量的探讨	胥思平(155)
胜利油田调整井固井技术	许利辉 张言杰 李 俊(159)
分支水平井完井设计与实践	杨 鹏 王敏生(162)
套管在井下的受力分析	岳远瞩(167)
提高大位移水平井固井质量方法	张言杰(171)
埕 306 井固井完井技术	张春林(176)
草 20 古潜山灰岩特稠油油藏完井技术	牟善波(179)
大位移井套管工具附件	王君书(182)

井下测量技术

常用水平井井眼轨迹测量技术	艾中华 王敏生(185)
超小尺寸 DWD 测量技术在卡塔尔油田的应用	崔剑英 贺昌华(190)

钻头的研究与使用

复合 PDC 钻头在桩西地区定向井中的应用	范兆祥(196)
三牙轮钻头井底流场分析	郭宝民(200)
PDC 钻头破坏形式、机理及控制	解巧云(205)

提高机械钻速

水力脉冲装置提高钻井速度研究	许利辉 李 静 王 亚(207)
利用综合钻井技术提高钻井速度	张令存(212)
一种快速钻井方式的试验及应用	许军富 耿应春 许越勇 左卫青(217)

钻井事故预防及处理

CB304 井固井事故的处理	安有杰(220)
工程师法压井技术	王瑞娥(223)
钻杆漏磁探伤设备的数字化改造	巴鲁军(228)
南海海相低压地层 MTC 堵漏新技术	练 钦(232)
桩海 10 井 7in 套管挂 5in 尾管堵炮眼工艺	谭化新(235)
螺杆钻具壳体脱壳的原因分析及预防	王富涛(237)
关井憋压法处理粘附卡钻和泥岩微缩径卡钻的实践	周利辉(239)

钻具在存放过程中的防腐问题	岳远瞩 (243)
营 45-斜 7 井油层套管的修复工艺与认识	李佩武 (246)
对焊钻杆热处理自动控制系统的研制	巴鲁军 (249)
水平井压井技术	王瑞娥 (253)

其 他

欠平衡钻井技术在胜利浅海应用展望	燕修良 (257)
柴油机冷却水的正确使用	孙长征 (261)
欠平衡钻井技术对油气井产能的影响	齐丽蓉 (264)
信息技术在钻井工程中的应用研究	崔剑英 (267)
欠平衡压差的影响因素分析	安有杰 (272)
胜利油田大位移钻井技术概况	周利辉 (280)
玻璃纤维增强塑料管在油田污水系统中的应用	路庆良 候 磊 (283)
载荷探测电缆对接技术及其应用	闫振来 孙铭新 于 波 (286)
油藏区块通用进罐率算法探讨	黄国忠 王 钊 孙秀英 王 亚 (291)
浅析钻井企业的市场竞争力	李 静 肖艳梅 (295)
超千米位移海油陆采井的钻井实践与认识	刘 虎 (300)
油藏数值模拟在双河油田 VI 油组的应用	孙秀英 王 亚 黄国忠 段秋红 (305)
实施螺杆钻具分级管理, 提高螺杆钻具供井质量	王富涛 (309)
PDC 钻头可钻式套管附件的应用	张春林 (311)
柴油机油在 190 系列柴油机上的使用	孙长征 (314)
一种新型的计量泵	路庆良 (318)
铝质管柱强度研究	练 钦 (322)
浅谈信息技术在钻井工程中的应用	吕静霞 孙 旭 (329)

导向组合复合钻进的几个问题及影响导向力的因素¹

王敏生 燕修良

(胜利石油管理局钻井工艺研究院)

摘 要 导向钻进技术在特殊工艺井施工中的应用越来越广泛,本文对导向组合复合钻进中的复合转速、井径及导向能力等几个问题进行了分析,并结合单弯单稳导向组合在胜利油田两口分支水平井中的应用情况,对影响导向组合钻进导向能力的因素和复合钻进中应注意的问题进行了分析和阐述。

主题词 (单弯单稳)导向组合 复合钻进 (复合)转速 井径 导向力

近年来, MWD+小角度单弯动力钻具的滑动导向组合在特殊工艺井,尤其是水平井中的应用越来越广泛。该组合可以通过连续滑动钻进、滑动和复合钻进相结合的方式实现井眼轨迹的增斜、降斜和稳斜,既达到了连续钻进的目的,又可随时根据需要调整井眼状态,有效地提高了钻井速度和轨迹控制精度。在胜利油田完成的两口双分支水平井——桩 1-支平 1 井及梁 46-支平 1 井的施工中,全面采用导向钻进技术,取得了很好的应用效果。

导向组合单弯动力钻具的选择既要考虑钻具的造斜能力,又要考虑复合钻进时的井下安全,施工中要实时进行井眼轨迹的计算和预测,及时对待钻井眼进行校正。影响导向组合复合钻进导向能力的因素较多,因此,每次下钻前都要结合实际情况,对下井组合进行仿真分析,以便通过调整合理的钻进参数来控制钻具的造斜及变方位能力。

一、常用单弯单稳钻具组合及钻进参数

在胜利油田的水平井施工中,多采用只带近钻头扶正器或近钻头垫块的单弯外壳动力钻具,属于单弯单稳导向钻具组合。以梁 46-支平 1 井为例,所用造斜钻具组合为:

$\phi 215.9\text{mmHJT}517 \times 0.25\text{m} + 1.5^\circ \phi 171.5\text{mmDN} + 431 \times 4\text{A}10 \times 0.38\text{m} + \text{NMDC} \times 8.02\text{m} + \text{MWDSUB} \times 1.54\text{m} + 4\text{A}11 \times 410 \times 0.6\text{m} + \text{HWDP} + \text{DP}$

井斜 50° 左右,改用部分倒装的钻具组合:

$\phi 215.9\text{mmHJT}517 \times 0.25\text{m} + 1.5^\circ \phi 171.5\text{mmDN} + 431 \times 4\text{A}10 \times 0.38\text{m} + 4\text{A}10 \times 410 \times 0.6\text{m} + \text{NMSCDP} \times 8.67\text{m} + \text{MWDSUB} \times 1.54\text{m} + \text{NMSCDP} \times 9.31\text{m} + \text{DP} \times 10-15 \text{柱} + \text{HWDP} + \text{DP}$

钻进参数:滑动钻进时,钻压 $50 \sim 140\text{kN}$,根据工具面需要调整;复合钻进时钻压 $30 \sim 80\text{kN}$,转盘转速 $40 \sim 60\text{rpm}$,排量 30L/s ,泵压 $14 \sim 17\text{MPa}$ 。

用两根无磁承压钻杆代替无磁钻铤,一方面可以最大限度地降低 MWD 短节和井下马达的弯曲应力,确保井下安全,同时可以有效地防止 MWD 数据受地磁场的干扰;倒装钻具,在直井段加一定数量的加重钻杆,以保证定向钻进时钻压的有效传递和克服井眼摩阻。

二、复合钻进的几个问题

1. 复合钻进时钻头转速

如图 1 所示,单弯单稳组合复合钻进过程中,动力钻具本身工作使钻头产生转速 n_1 ,钻

¹ 本文为 863 青年基金项目(2001AA616130)的部分内容。

头的相对角速度 $\bar{\omega}_1$ ；同时转盘转动使钻柱产生转速 n_2 ，钻柱的相对角速度 $\bar{\omega}_2$ 。依据运动学原理，钻头的绝对角速度应等于钻柱和钻头相对角速度的叠加。

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2 \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (2)$$

复合钻进过程中，钻头绝对角速度的方向随钻柱的旋转时刻发生变化，但绝对角速度的大小是不变的，即：

$$\omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + 2\omega_1\omega_2 \cos \theta} \quad (3)$$

则钻头的绝对转速为：

$$n = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + 2n_1n_2 \cos \theta} \quad (4)$$

由于考虑到弯外壳动力钻具本身强度的限制，一般 θ 都很小，实践中即使在浅的软地层 θ 也不能大于 1.75° ， $\cos \theta \approx 1$ ，因此可以近似认为：

$$n = n_1 + n_2 \quad (5)$$

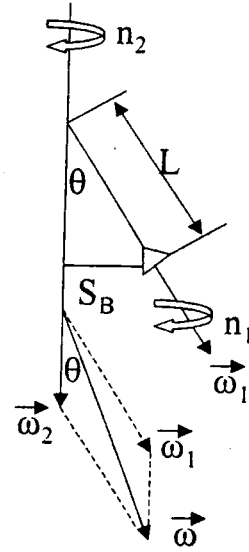


图1 复合钻进时钻头转速示意图

导向组合复合钻进时受弯壳体角度的影响，底部组合扭矩较大，转盘转速不能太高，通常在 65rpm 以下；复合钻进时要根据具体情况判断钻头的使用寿命。

2. 复合钻进时的井径问题

如图1所示，钻头至弯点距离为 L ，导向钻具复合钻进过程中，由于弯壳体造成一定的钻头偏距 S_B ，对井径大小会有一定的影响。设钻头直径为 D_b ，复合钻出的井眼直径为 D ，则 D 的范围可由式 (6) 确定：

$$D_b \leq D \leq (D_b + 2S_B) \quad (6)$$

$$S_B = L \sin \theta \quad (7)$$

考虑到底部组合的弹性变形和钻头侧向力对井径的影响，根据经验，在不考虑由于钻井液冲刷和井壁不稳定等因素影响的情况下，复合钻进时的井径可按下式预测：

$$D = D_b + S_B \quad (8)$$

表1反映了桩1-支平1井第二分支井眼井径的实测情况，施工中采用 1.5° 的 $\Phi 171.5\text{mm}$ 单弯螺杆钻具，钻头至弯点 1.25m，按式 (8) 计算， D 为 248.62mm，理论计算结果与实际情况比较吻合，误差均小于 8%。

三、复合钻进时导向能力分析

1. 复合钻进时导向力的计算

导向钻具组合复合钻进可以看作导向组合的工具面不断随钻柱转动而有规律改变的过

程, 钻柱转动一周内的总体导向效果不能用某一特定工具面装置角时的钻头所受侧向力来描述, 但可以用钻柱复合旋转一周内、工具面装置角从 0° 转到 360° 的变化过程中钻头上的平均导向力来表述。

表 1 桩 1-支平 1 井第二分支井眼井径情况

井 段/m	钻头外径/mm	平均井径/mm
1341~1635	215.9	248.92
1635~1710	215.9	261.62
1710~1850	215.9	231.14
1850~1872	215.9	243.84

在分支井井眼轨迹控制施工过程中重点是要了解井斜的变化情况, 寻找复合钻进过程中作用在钻头上的增斜力和井斜增降的关系, 并研究影响复合钻进增斜力的因素, 以指导现场技术人员选择钻具和施工参数, 方位力的计算可以帮助施工人员更全面地了解待钻井眼的延伸趋势。

设导向钻具在某一时刻的工具面装置角为 ω , 在这一装置角位置可计算出钻头上的增斜力为 $F_\alpha(\omega)$ 和增方位力 $F_\phi(\omega)$ 。取钻具组合由转盘旋转一周为研究对象, ω 的取值范围为 0° 到 360° , 均匀取值。设计算点数为 n , 则装置角变化步长为 $\Delta\omega = 360^\circ / n$ 。计算点数越多, 计算越精确。钻具组合复合钻进一周内在钻头上作用的增斜力 F_α 及增方位力 F_ϕ 平均值分别为:

$$F_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{\omega=0}^{360} F_\alpha(\omega) \quad (9)$$

$$F_\phi = \frac{1}{n} \sum_{\omega=0}^{360} F_\phi(\omega) \quad (10)$$

则导向合力 F 为:

$$F = \sqrt{F_\alpha^2 + F_\phi^2} \quad (11)$$

导向合力单位为 kN, 导向合力的方向角 ϕ (定义为导向合力与高边的夹角, 以高边顺时针计) 为:

$$\phi = \arctan\left(\frac{F_\alpha}{F_\phi}\right) \quad (12)$$

2. 现场应用

目前, 国内外学者提出了多种计算和分析底部组合力学性能的数学模型, 不同的模型计算出的结果有一些差别, 但总的趋势比较一致。在每一趟钻具下井前, 都要利用分析软件, 结合具体参数进行导向能力的分析, 并以此为基础选择不同结构的钻具和合理的钻进参数。

四、复合钻进时导向力的影响因素

从两口试验井的综合试验情况看, 单弯单稳导向组合复合钻进的效果有较大区别。主要

是由于实钻的结果是底部组合力学性能、地层情况、钻进参数及其他众多影响因素的综合效应。影响导向组合复合钻进效果的因素主要表现在以下几个方面:

(1) 钻进的井眼轨迹总是三维的,并不在理想的铅直平面内,上部井眼曲率对井眼的延伸趋势有较大影响,从而导致导向组合方位力在复合钻进一周内的方位力分布不对称。表现为复合钻进时方位有一定漂移,井斜较小时比较明显。

(2) BHA 的结构、井眼曲率及弯曲平面倾角的存在,会导致导向组合在复合钻进一周内的增斜力分布不对称,导向组合可能有增斜、稳斜或降斜,施工中要根据模拟计算的结果确定 BHA 的结构和钻进参数。

(3) 单弯单稳导向钻具的近钻头稳定器到钻头的距离对 BHA 的导向合力有较大影响,在其他参数不变的情况下,近钻头稳定器越靠近钻头,导向合理越大,复合钻进增斜的趋势越明显。

(4) 单弯单稳导向钻具的近钻头稳定器直径对导向力的影响很大,近钻头稳定器的直径越小,增斜力越小,在钻柱复合钻进一周之内,增斜力的变化幅度也越小。

(5) 在水平段复合钻进时的增斜力随稳定器直径的减小而降低,这说明,减小近钻头稳定器的直径有助于稳斜钻进水平段。在梁 46-支平 1 井水平段施工中,部分井段采用不带近钻头垫块的动力钻具,有一定的降斜趋势。

(6) 单弯单稳导向钻具的导向合力在其他条件不变的情况下,一般随井斜角的增大而增大,井斜 60° 以后,这种趋势有所缓解。

(7) 动力钻具的选择对安全钻进起确定性的作用,结构弯角不能过大,两口试验井中基本采用 15° 单弯;转盘转速不能太高,否则易发生钻具断脱事故。

(8) 钻井参数对单弯单稳导向钻具的增斜能力有较大的影响,对于井深较浅的井尤其明显。在桩 1-支平 1 井的两个分支井眼水平段施工中,通过模拟计算,选取合适的钻进参数,收到了十分理想的效果,水平段基本全利用复合钻进完成,即提高了钻速,又有利于携岩。

五、时效分析及结论

1. 时效分析

由于成功地应用了导向钻进技术,桩 1-支平 1 井的钻进时效大大提高,上分支(桩 1-支平 1-1 井)从造斜开始到 A 点的 366m (井眼为 $12\frac{1}{4}$ in) 的井段仅用了两趟钻共用时 38 h, 236m 水平段仅用一趟钻 13h; 下分支从造斜到 A 点 332m 的井段仅用一趟钻用时 29h, 186m 水平段仅用一趟钻 7h。桩 1-支平 1 井斜井段及水平段施工时间仅占施工总时间的 16.7%; 梁 46-支平 1 井两分支井眼的斜井段及水平段施工时间仅占施工总时间的 39%。两口试验井的钻井时效,见表 2。

表 2 试验井钻井时效分析

		直井施工	开窗侧钻	定向施工	更换井队	打捞回收	其他时间
梁 46-支平 1 井	天数/d	21	12	76	12	19	55
	比例/%	10.70	6.20	39	6.20	9.70	28.20
桩 1-支平 1 井	天数/d	4.79	6.94	9.56		9.19	30.5
	比例/%	8.40	12.10	16.70		16	53.20

2. 结论

(1) MWD+小角度单弯动力钻具的滑动导向组合可以通过滑动和复合钻进相结合的方式根据需要随时调整井眼状态,是有效提高钻井速度和轨迹控制精度的有效手段;

(2) 导向组合复合钻进时钻头的绝对转速可以认为是转盘转速与动力钻具转子转速的叠加;

(3) 在不考虑由于钻井液冲刷和井壁不稳定等因素影响的情况下,导向组合复合钻进时的井径可以用钻头直径加钻头偏距来估算;

(4) 导向组合复合钻进的导向力可以用钻柱复合旋转一周内、工具面装置角从 0° 转到 360° 的变化过程中钻头上的平均导向力来表述;

(5) 单弯单稳导向组合复合钻进的效果受底部组合力学性能、地层情况、井眼状况、钻进参数等众多因素的影响,因此每一趟钻具下井前,应结合具体参数进行导向能力的分析。

参 考 文 献

1. 王正湖等. 国内第一口分支水平井钻井技术. 石油钻探技术, 2001, 29 (1)
2. 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用. 北京: 石油工业出版社, 2001, 3
3. 刘亚等. 江苏油田三种典型钻具组合复合钻进导向力计算. 石油钻探技术, 2001, 29 (2)
4. 狄勤丰. 滑动导向钻具组合复合钻井时导向力的计算分析. 石油钻采工艺, 2000, 22 (1)
5. 赵金海等. 复合钻进中导向钻具稳斜能力的理论研究与实践. 钻进技术, 2001
6. 王敏生. 分支井钻井工艺技术研究. 钻井工艺研究院, 2002, 8

定向井三维轨道的选择和设计

解巧云

(胜利石油管理局钻井工艺研究院)

摘 要 利用空间三段制、五段制和双增型三种三维绕障定向井轨道类型设计方法, 指出应根据具体情况来选择不同的井眼轨道类型。文中不但给出了所有的计算公式, 还给出了计算实例。

主题词 定向井 井眼轨迹 障碍物 三维设计 垂直剖面 全角变化率 实例

一、前言

一般情况下, 定向井井眼设计成二维曲线, 但当井位与目标点所在的铅垂平面内存在无法通过的障碍物时, 就要对井眼进行三维绕障设计。许多文献对此进行了研究, 有选用空间“S”型井眼, 直接选用三段式井眼设计模式(部分公式有误), 而且对为何选用上述轨道类型未作说明。本文针对不同的具体情况, 选用不同的轨道类型, 并给出了具体的设计方法。而且, 对五段制、双增型剖面进行了详细的分析和公式推导。

二、初设水平投影

1. 需要给定的设计条件

D_a , D_i , N_T , N_H , E_T , E_H , R_H , K_1 , K_2 , K_m 。其中, 曲率(K_i)和曲率半径(R_i)可以相互换算:

$$R_i = \frac{1719}{K_i} (i=1, 2, \dots, H) \quad (1)$$

2. 井眼总的水平投影长度计算

井眼水平投影由稳方位段、变方位段、稳方位段组成, 其形状见图1。根据 N_T 、 E_T 和 N_H 、 E_H 所在的象限, 分别求出靶点和绕障圆圆心的闭合方位角 ϕ_T 、 ϕ_H 。

当 $N_T > 0$, $E_T > 0$ 时, 有

$$\phi_T = \arctan \frac{E_T}{N_T} \quad (2)$$

当 $N_T > 0$, $E_T < 0$ 时, 有

$$\phi_T = \arctan \frac{E_T}{N_T} + 360 \quad (3)$$

当 $N_T < 0$ 时, 有

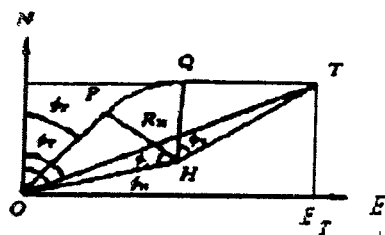


图1 水平投影图

$$\phi_T = \arctan \frac{E_T}{N_T} + 180 \quad (4)$$

当 $N_T=0$, $E_T > 0$ 时, 有 $\phi_T=90^\circ$;

当 $N_T=0$, $E_T < 0$ 时, 有 $\phi_T=270^\circ$ 。

同理, 将上述式中 N_T 、 E_T 分别用 N_H 、 E_H 代替, 可以求出 ϕ_H , 并根据 ϕ_T 和 ϕ_H 的大小判断是左绕还是右绕: $\phi_T < \phi_H$ 为左绕; $\phi_T \geq \phi_H$ 为右绕。

然后计算水平投影长度:

$$\overline{OH} = \sqrt{E_H^2 + N_H^2} \quad (5)$$

$$S_p = \overline{OP} = \sqrt{E_H^2 + N_H^2 + R_H^2} \quad (6)$$

$$\overline{HT} = \sqrt{(E_T - E_H)^2 + (N_T - N_H)^2} \quad (7)$$

$$\overline{OT} = \sqrt{E_T^2 + N_T^2} \quad (8)$$

$$\overline{QT} = \sqrt{(E_T - E_H)^2 + (N_T - N_H)^2 - R_H^2} \quad (9)$$

$$\phi = \arccos \frac{(\overline{OH})^2 + (\overline{HT})^2 - (\overline{OT})^2}{2\overline{OH} \times \overline{HT}} \quad (10)$$

$$\phi_1 = \arccos \frac{\overline{RH}}{\overline{OH}} \quad (11)$$

$$\phi_p = \phi_H \pm (90 - \phi_1) \quad (12)$$

$$\phi_2 = \arccos \frac{\overline{RH}}{\overline{HT}} \quad (13)$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_1 - \phi_2 \quad (14)$$

$$\phi_Q = \phi_p \pm \Delta\phi \quad (15)$$

$$\overline{PQ} = \frac{\pi}{180} R_H \Delta\phi \quad (16)$$

$$S_Q = S_p + \overline{PQ} \quad (17)$$

$$S = S_Q + \overline{QT} \quad (18)$$

式(12)、(15)中,取“+”表示右绕;取“-”表示左绕。求出总水平投影长度后,可以初设垂直剖面图。

三、初设垂直剖面图

1. 轨道类型的选择

定向井常用轨道有三段制、五段制和双增型三种剖面。对于三维绕障定向井可分别定义如下:空间三段制、空间五段制和空间双增型剖面。轨道类型的选择依据:

(1) 凡无特殊要求的单靶定向井,均可选用空间三段制剖面。

(2) 对造斜点位置确定且靶点井斜角有特殊要求的单靶定向井,根据式(19)计算后选择剖面:

$$\alpha_b = 2 \arctan \frac{D_e - \sqrt{D_e^2 + S_e^2 - R_e^2}}{R_e - S_e} \quad (19)$$

$$D_e = D_t - D_a - R_2 \sin \alpha_t \quad (20)$$

$$S_e = S - R_1 + R_2 \cos \alpha_t \quad (21)$$

$$R_e = R_1 - R_2 \quad (22)$$

式(20)、(21)、(22)中的 $R_2=0$,求得 α_b ,再根据 α_b 和 α_t 的大小,选择剖面类型:

①若 $\alpha_b > \alpha_t$,则选空间五段制剖面;

②若 $\alpha_b < \alpha_t$,则选空间双增型剖面;

③若 $\alpha_b = \alpha_t$,则选空间三段制剖面。

2. α_b 的计算

(1) 空间三段制剖面

令式(20)、(21)和(22)中的 $R_2=0$,利用式(19)即可求出 α_b 。

(2) 空间五段制剖面将式(20)、(21)和(22)中的 R_2 用负值代入,利用式(19)就可求出 α_b 。

稳斜段长:

$$L_w = \sqrt{D_e^2 + S_e^2 - R_e^2} \quad (23)$$

(3) 空间双增型剖面将式(20)、(21)和(22)中的 R_2 用正值代入,利用式(19)、(23)可分别求得 α_b 和 L_w 。

四、校核井眼曲率

1. 空间三段制剖面

(1) 计算垂直剖面图上造斜段终点水平投影长度:

$$S_b = R_1 (1 - \cos \alpha_b) \quad (24)$$

(2) 计算变方位段始点井斜角 α_p 和终点井斜角 α_Q 。
当 $S_Q < S_b$ 时 (增斜、增方位段), 有

$$\alpha_p = \arccos \frac{r_1 - S_p}{R_1} \quad (25)$$

$$\alpha_Q = \arccos \frac{r_1 - S_Q}{R_1} \quad (26)$$

当 $S_Q > S_b$ 时, 可以分为两种情况:

① $S_p < S_b$ 有

$$\alpha_Q = \alpha_b \quad (27)$$

$$\alpha_p = \arccos \frac{r_1 - S_p}{R_1} \quad (28)$$

② $S_p \leq S_b \leq S_Q$, 因为都在稳斜段, 三点的井斜都一样, 即:

$$\alpha_p = \alpha_Q = \alpha_b \quad (29)$$

(3) 计算在不同情况下的井眼曲率最大值 $K_{\max}$:

① 当 $S_Q < S_b$ 时, 有

$$K_{\max} = K_Q = \sqrt{K_1^2 + K_H^2 \sin^4 \alpha_Q} \quad (30)$$

② 当 $S_p \leq S_b \leq S_Q$ 时

$$K_{\max} = K_b = \sqrt{K_1^2 + K_H^2 \sin^4 \alpha_b} \quad (31)$$

③ 当 $S_p > S_b$ 时, 有

$$K_{\max} = \max(K_H \sin 2\alpha_b, K_1, K_2) \quad (32)$$

2. 空间五段制和双增型剖面

(1) 计算垂直剖面图上第一造斜段终点水平投影长度和第二造斜段始点或降斜段始点水平投影长度 S_c 。 S_b 可由式 (24) 计算:

$$S_c = S_b + L_w \sin \alpha_b \quad (33)$$

(2) 计算变方位段始点井斜角 α_p 和终点井斜角 α_Q

① 当 $S_Q < S_b$ 时, 由式 (25) 和 (26) 计算;

② 当 $S_b \leq S_p \leq S_c, S_b \leq S_Q \leq S_c$ 时, 由式 (27) 计算;

$$\text{③ 当 } S_p > S_c \text{ 时, 有} \quad \alpha_p = \arccos \left| \frac{S_p - S_c}{R_2} \pm \cos \alpha_b \right| \quad (34)$$

$$\alpha_Q = \arccos \left| \frac{S_Q - S_c}{R_2} \pm \cos \alpha_b \right| \quad (35)$$

请注意, 下面的两种情况都有上面的三种最基本的特例, 可以求出公式。

④当 $S_p < S_b < S_Q$, 有

$$\alpha_p = \arccos \frac{r_1 - S_p}{R_1} \quad (36)$$

$$\alpha_Q = \alpha_b \quad (37)$$

⑤ $S_p < S_c < S_Q$, 有

$$\alpha_p = \alpha_b \quad (38)$$

$$\alpha_Q = \arccos \left| \frac{S_Q - S_c}{R_2} \pm \cos \alpha_b \right| \quad (39)$$

式中, “+” “-” 分别表示空间五段制及空间双增型剖面。

(3) 计算在不同情况下的井眼曲率最大值 $K_{\max}$

①当 $S_Q < S_b$ 时, 由式(30)计算;

②当 $S_p \leq S_b \leq S_Q$ 时, 由式(31)计算;

③当 $S_b \leq S_p \leq S_c$, $S_b \leq S_Q \leq S_c$ 时, 由式(32)计算;

④当 $S_c \leq S_p \leq S_Q$ 时, 有

$$K_{\max} = K_c = \sqrt{K_2^2 + K_H^2 \sin^4 \alpha_b} \quad (40)$$

⑤当 $S_Q > S_c$ 时, 有

$$K_{\max} = K_p = \sqrt{K_2^2 + K_H^2 \sin^4 \alpha_p} \quad (41)$$

计算出 $K_{\max}$ 后, 与井眼曲率限定值 K_m 进行比较。如果 $K_{\max}$ 不大于 K_m , 则可进行井眼参数计算。否则应增大安全圆半径 R_H , 重设水平投影图。

五、各点参数的计算

1. 垂直剖面图上节点参数的计算

垂直剖面图上节点参数的计算同常规二维剖面的计算方法一样。

2. 不同条件下水平投影图上节点井深和垂深的计算

(1) 当 $S_Q < S_b$ 时, 有

$$L_p = D_a + \frac{\pi R_1 \alpha_p}{180} \quad (42)$$

$$D_p = D_a + R_1 \sin \alpha_p \quad (43)$$

$$L_Q = D_a + \frac{\pi R_1 \alpha_Q}{180} \quad (44)$$

$$D_Q = D_a + R_1 \sin \alpha_Q \quad (45)$$

(2) 当 $S_b \leq S_p \leq S_c$, $S_b \leq S_Q \leq S_c$ 时, 有

$$L_b = D_a + \frac{\pi R_1 \alpha_b}{180} \quad (46)$$

$$D_b = D_a + R_1 \sin \alpha_b \quad (47)$$

$$L_p = L_b + \frac{S_p - S_b}{\sin \alpha_b} \quad (48)$$

$$D_p = D_b + \frac{S_p - S_b}{\tan \alpha_b} \quad (49)$$

$$L_Q = L_p + \frac{S_Q - S_p}{\sin \alpha_b} \quad (50)$$

$$D_Q = D_p + \frac{S_Q - S_p}{\tan \alpha_b} \quad (51)$$

(3) 当 $S_p > S_c$ 时, 有

$$L_c = L_b + L_w \quad (52)$$

$$D_c = D_b + \frac{S_c - S_b}{\tan \alpha_b} \quad (53)$$

$$L_p = L_c + \frac{\pi R_2 |\alpha_p - \alpha_b|}{180} \quad (54)$$

$$D_p = D_c + R_2 |\sin \alpha_c - \sin \alpha_b| \quad (55)$$

$$L_Q = L_p + \frac{\pi R_2 |\alpha_p - \alpha_Q|}{180}, \quad (56)$$

$$D_Q = D_p + R_2 |\sin \alpha_p - \sin \alpha_Q| \quad (57)$$

以下两种情况, 也根据上面的三种基本情况所得。

(4) $S_p < S_b < S_Q$ 时, 有

$$L_p = D_a + \frac{\pi R_1 \alpha_p}{180} \quad (58)$$

$$D_p = D_a + R_1 \sin \alpha_p \quad (59)$$

b 、 Q 点都在增斜、增方位段, 因此, 算法一样。用 b 点代替 p 点的参数就可以算出了。

$$L_Q = L_b + \frac{S_Q - S_b}{\sin \alpha_b} \quad (60)$$