

石油勘探开发科学研究院研究生部

学位论文摘要汇编

第二集

油气田钻井、开发工程及石油机械工程部分

石油工业出版社

石油勘探开发科学研究院研究生部

学位论文摘要汇编

第 二 集

油气田钻井、开发工程及石油机械工程部分

652/124



石 油 工 业 出 版 社

B 795003

内 容 提 要

本书是石油勘探开发科学研究院研究生部博士、硕士研究生的论文摘要。内容包括油气田钻井、开发和机械。这些论文反映了我国科学研究的新水平。对于从事钻井、开发和石油机械的科研、生产和教学人员有一定的参考价值。

主编 任子琪
顾问 王兰芝 余正纲
孙家林 张树晶

石油勘探开发科学研究院研究生部
学位论文摘要汇编
第 二 集
油气田钻井、开发工程及石油机械工程部分

石油工业出版社出版发行
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社排版印刷

787×1092 毫米 16 开本 $15\frac{3}{4}$ 印张 394 千字 印 1-1,200

1990 年 12 月北京第 1 版 1990 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0461-5/TE·443

定价: 4.80 元



前 言

我院从一九七九年开始招收研究生以来，已毕业了硕士研究生 163 名，博士研究生 4 名。在学研究生中派出国外攻读博士学位的有 25 名。研究生在学期间，对基础理论、专业知识、计算机应用以及外语等方面均受到了较严格的训练，并参加了结合生产实际的各种课题的研究，完成了一些有一定理论水平和有经济价值的论文，有些已在国内外刊物上发表，有些已在生产中推广应用。我们将从今年起陆续汇编出版研究生学位论文摘要集，以便加快新理论、新方法、新技术的相互交流和推广应用。由于初次编印，水平有限，不妥之处，敬请指正。

编 者

1988 年

序

在世界新技术革命迅速发展的今天，我们必须抓紧时机急起直追。根据科研、生产的需要和本人条件来选才和培养是必要的，培养研究生则是一项有效的措施。

培养研究生於在读期间完成，技术或有产品的研究成果是我们的一个具体目的。近两年我院的高年级在读研究生中，已有几项研究成果有偿提供给外单位应用，这样做是一个方向。实践证明：研究生不仅仅是培养对象，还是完成国家科研任务的一支生力军和后备力量。

注意并提高研究生素质，更是我们的一项基本任务。今后我们应该把这些工作做得更好。

翁文波

1988.7

目 录

对用井下动力钻具钻井时有关力学问题的分析和定向井轨道预测控制的初步研究(苏义脑)	(1)
定向井轨道控制技术中方位控制器的理论分析与实际应用(黄惠泽)	(13)
试井分析中有效井径模型解析解及微机软件研制与应用(张义堂)	(29)
变粘度悬浮输砂深井压裂数值计算方法(杜长安)	(47)
压裂井的试井分析原理及应用(熊春明)	(53)
压裂液对地层渗透性和裂缝导流能力伤害的研究(尉春生)	(56)
裂缝支撑方案的优化、实施与评价(谢桂学)	(62)
用自动历史拟合确定相对渗透率方法研究(薄启亮)	(67)
注 N_2 混相驱替实验的影响因素研究(李炳辉)	(79)
用非稳定法测定低渗岩样的克氏渗透率(景六刚)	(85)
高尚堡部分地层损害评价及方法研究(邹 兴)	(90)
注 N_2 对凝析气藏和轻质油藏相态影响的研究(孙福街)	(92)
非对称大型稀疏块状线性方程组的推广共轭斜量解法及在黑油模型中的应用(王克非)	(97)
原油/碱—表面活性剂—聚合物复配体系界面性质研究(赵 刚)	(101)
HPAM 流经多孔介质的降解(杨光正)	(105)
大庆、大港原油非烃组份对蜡晶形成和降凝效果的影响(庞万忠)	(113)
地窖油开采的数值模拟研究(景凤江)	(123)
混相驱数值模拟及影响因素研究(于浩方)	(127)
多重网格法在油藏数值模拟计算中的研究(刘合年)	(132)
注蒸汽热采工程经济分析方法研究(邓澍宏)	(140)
温度对高凝油流动特性及流体驱油效率的影响(何 中)	(147)
油藏水浸的渗流力学计算与物质平衡分析方法(黄天星)	(162)
多断块油田地下连通状况识别方法和程序设计研究(叶继根)	(169)
参数场估值的数学方法研究(李 励)	(173)
注水开发油田动态系统多步递阶模型和实现方法(朱国金)	(178)
影响我国水驱砂岩油田采收率的因素分析(周 斌)	(181)
泡沫稳定性的研究(谢剑耀)	(185)
定向井下部钻具组合设计专家系统的研制(杨 辽)	(191)
自适应实时全联逻辑 3^+ 网系统软件(刘小丽)	(197)
液力变矩器转动叶轮流场的激光测试与三元流动计算的方法研究(孟庆昆)	(211)
有杆抽油系统动力学分析(郑晓峰)	(216)
高速重载链传动的研究(陈 健)	(220)

长距离热油输送管线的优化运行(李国庆) (223)

钻井装置配置的专家系统研究(陈 浩) (226)

采油井架的有限元非线性动力分析(杨继跃) (229)

非线性有限元在井架结构稳定性分析中的应用(张廷刚) (232)

修井井架直线度对井架承载能力的影响(徐维华) (238)

对用井下动力钻具钻井时有关力学问题的分析 和定向井轨道预测控制的初步研究

· 博士研究生 苏义脑
导 师 白家祉

一、引 言

定向井的井眼轨道控制技术是定向井成套技术中的关键环节。研究这项理论和技术的目的在于为了能有效地控制钻头的实钻轨道,使之尽量靠近预定的理论轨道,从而提高井身质量,缩短钻进周期,降低钻井成本。不过,目前国内外的技术现状距离这一目标尚相差甚远。随着石油勘探开发形势的发展,定向井数日益增多,因此,开展对这一课题的研究具有重要和迫切的意义。

一般来说,影响井眼轨道的因素有如下三类:其一是下部钻柱组合的结构(包括钻头类型)和变形边界条件(即井身条件);其二是地层特性;其三是工艺参数(如钻压、钻井液性能及排量等)。井眼轨道控制技术的任务,就是在已定的地层条件下,通过合理设计钻具组合和采取合理的工艺参数及技术措施,利用或克服地层力的影响,控制钻头上三维力的值,从而控制相应的三维位移,以控制钻头的实际轨道。

自本世纪二十年代至今,前人在下部钻柱组合的受力与变形分析方面做了大量的研究工作,卓越代表有 A.Lubinski、K.K.Millheim、B.H.Walker 和白家祉。但他们的工作主要是研究转盘钻的下部钻柱组合(BHA),对弯接头-井下动力钻具组合(BS-DHM)的受力变形则研究甚少。在地层力方面,国内外已有多种定性理论和定量公式,但目前看法尚不统一,并且主要是研究地层自然造斜力,而对定向井中的地层造斜、变方位作用还未探讨。在侧面切削方面,虽然一些学者曾进行了室内实验研究(其中最出色的当属 K.K.Millheim 及其同事),但他们并未建立起数学模型。尽管有的研究者曾建立过侧切模型,但因其中包含参数过少,所以不能更全面地反映侧切过程,而且由于室内实验与实际钻井过程的差异,致使所得结果尚不能用于指导实际钻井;在轨道预测方面,目前国内外从事该项研究的人员较少,研究成果尚不多见。

综上所述,本文拟从如下方面开展进一步的研究工作:

(一) 用纵横弯曲法求解井下动力钻具组合在各种不同井身条件下的受力与变形,并考虑钻头转动效应,井身曲率效应及钻头结构的影响,求出钻头上的造斜力和变方位力;

(二) 研究定向井中井下实际钻压和动力钻具组合的反扭角在多种井身条件与载荷条件下的变化规律,以求得更加接近实际的钻压值和装置角;

(三) 建立更加符合实际的地层力计算模式,定量计算定向井中的地层造斜力和变方位力,并初步探索钻头结构变方位力;

(四) 采用理论分析和实际资料统计相结合的方法,建立适合于实钻过程的多元侧切模型,确定钻头上的三维位移分量;

(五) 建立井斜、方位及其变化率的预测模型,进行定量预测预报,重点解决造斜段的

井斜、方位预测问题;

(六) 研制新的钻具组合和井下工具;

(七) 建立定向井轨道预测和控制软件包。

二、用纵横弯曲法求解弯接头-井下动力钻具组合的受力与变形

本文在若干力学假设的基础上,把弯接头-井下动力钻具组合视为受纵横弯曲载荷的连续梁,从弯接头和上切点两处断开,通过连续条件,建立三弯矩方程组,从而求解出钻头造斜力、变方位力、钻头倾角 (Tilt-Angle)、每跨梁的挠度与支座反力等。

弯接头-井下动力钻具组合 (BS-DHM) 与转盘钻下部钻柱组合 (BHA) 相比多出了两个参数,即弯接头的弯角 γ 和钻具在井底的装置角 Ω (又称重力工具面角)。另外,由于动力钻具的具体结构,使它和钻铤在受力变形方面存在差异。这三点,增加了分析问题的难度和复杂性。由于 Ω 的影响,无论是在三维、二维甚至一维井眼中,一般来说,BS-DHM 的变形和受力均属三维问题,即既有变井斜力,同时也有变方位力。由于受 γ 弯角和钻具本身刚度不均的影响,若不经特殊处理,则不能采用纵横弯曲法求解。

本文首先提出一个力学命题,把连续梁的连续条件加以扩展,使之既适用于直梁,也适用于曲梁,从而解决了弯角 γ 顶点处的连续条件。另外提出了处理弯角 γ 的两种等效方法,并从理论上证明了二者的等效关系,推出了等效关系式 (见附录, (一) 和图 1-1, 图 1-2)。

本文用一个与弯接头以下钻具组合等长度、等外径、等刚度、均匀、连续的等圆环截面梁柱作为动力钻具的等效梁柱 (等效钻铤),并在实验室内,通过实验方法测定螺杆钻具的等效抗弯刚度 EI_d 值;又通过实验测定了消除螺杆钻具橡胶扶正轴承大变形影响的侧向力临界值。

在此基础上,分别对一维井身、二维井身和三维井身条件下的 BS-DHM,建立相应的连续条件,边界条件和三弯矩方程组,编制出相应的计算机软件,计算钻头造斜力、变方位力、钻头倾角,从而完成 BS-DHM 的一维分析、二维分析和三维分析。

三维分析的基本思想是把井身轨道平面和工具平面分别向两个正交平面 P、Q 进行投影 (其中 P 为铅垂面),求出 P、Q 两平面内的井身曲率 K_P 、 K_Q 和计算弯角 γ_P 、 γ_Q ,重力效应集中在 P 平面内考虑。然后分别对 P、Q 平面分别计算钻头侧向力 R_{BP} 和 R_{BQ} , R_{BP} 即为造斜力, R_{BQ} 即为变方位力。本文利用空间关系分别推导了 K_P 、 K_Q 、 γ_P 、 γ_Q 的精确计算式,并导出了相应的近似计算式。(见附录, (二) 及图 3、4)

从垂直井或一维斜井开始造斜或扭方位,直至钻具组合完全进入二维井身或三维井身之前,这一井段称为过渡井段。在过渡井段中,BS-DHM 的受力变形与一、二、三维井身下不同。本文推导了计算过渡井段中 BS-DHM 受力变形的方法和公式。

对弯接头上方带有任意数目稳定器的井下动力钻具组合,本文也推导了相应的计算公式,编制了计算软件。

在上述基础上,本文推出了适用于各种井身条件,带有任意装置角和钻头地层力偶参数的动力钻具普遍方程,并提出了判断边界条件的原则。

纵横弯曲法一般只用来处理两个稳定器 (支点) 间为同种规格钻铤的钻柱组合。本文通过进一步的理论研究,建立相应的补充方程,使纵横弯曲法的功能扩展到求解变截面 (变刚

度) 钻柱组合。

另外, 本文根据实际存在的曲率效应, 提出了钻头侧向力的修正公式, 使计算结果与实际情况进一步相符。

本文用研制的计算软件, 对 BS-DHM 在一、二、三维井身条件下的受力进行计算, 分别分析了在不同井身条件下, 钻具组合的结构参数 (弯接头度数、下部钻柱组合长度及抗弯刚度、弯接头外径、第二跨钻铤外径与刚度), 工艺参数 (钻压、装置角 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$), 井身参数 (井径、井斜角、造斜率、变方位率) 等对钻头造斜力和变方位力的影响。本文列举 17 个算例, 给出 23 条关系曲线。

三、几个有关力学问题的分析

1. 在造斜井段中井底钻压值的理论分析与计算

钻井界公认, 由于诸多因素影响, 井底真实钻压与井口表计钻压存在差异。由于这一问题的复杂性, 尚未见国内外有深入研究井底钻压计算方法的文献。在目前缺少 MWD 的条件下, 人们一般采用井口表计钻压代替井底钻压进行分析计算。这对于钻井力学的研究来说显然是不够的。本文对解决这一问题进行了初步的理论研究。

本文考虑了二维井身中的钻柱自重、轴力、泥浆浮力、井壁对于钻柱的支反力和摩擦力, 以及井眼的曲率, 建立了描述钻柱轴向力 $P(\alpha)$ 的微分方程 (一元线性非齐次方程)。解此微分方程, 得出了计算井底钻压的公式; 并根据 BS-DHM 和 BHA 的差别, 分别写出了井下动力钻具、转盘钻的井下钻压计算公式, 文中举例作了计算, 并作曲线分析了井下钻压的变化规律。

2. 井下动力钻具反扭角的计算

装置角对 BS-DHM 的力学特性和井身轨道影响甚大, 而马达反扭角又直接影响装置角, 在目前随钻测斜仪尚未普及的情况下, 比较准确地计算反扭角至关重要。

前人曾对反扭角计算进行过一定的研究。但由于实际问题的复杂性, 而他们的前提假设又过于简化, 致使计算结果往往存在较大误差。本文重新研究这一问题, 采用了进一步接近实际的假设, 考虑了井身结构 (段制)、曲率、钻具的实际结构 (马达、钻铤、钻杆长度及其与井身的相对位置)、上切点位置以及泥浆浮力、钻柱自重、轴力和马达压降等因素对摩擦力矩和反扭角的影响, 推出了在各种不同井段下的摩擦力矩、有效长度、反扭角的计算公式, 并编制了计算软件。

本文给出了两个算例。其中一例是辽河油田某定向井, 在降斜段 (井深 2380m) 用 $6\frac{1}{2}''$ Dyna-Drill 扭方位, 施工者根据国外公司推荐表中查得反扭角为 80° , 实测仅 14° 左右; 本文按所推公式进行计算, 结果为 $12.98^{\circ} \sim 14.86^{\circ}$ (取摩擦系数 $\mu = 0.20 \sim 0.18$), 与实测值很接近。

3. 考虑钻头转动摩擦效应对造斜力和变方位力的修正

在造斜或降斜的情况下, 钻头接触上井壁或下井壁, 由于钻头的转动摩擦和铣削作用, 致使钻头发生不同方向的方位漂移力, 引起方位改变。关于这一点, 现场多次观察到过此类现象, 苏联 O.K. мамедбеков 曾著文作过研究。但他讨论的是仅存在造斜力 (即一维或二维) 的情况, 而普遍的情况是钻头上同时作用有造斜力和变方位力 (三维问题)。

本文针对这种普遍情况重新加以推导, 对钻头建立刚体平面运动方程式, 求出计算造斜

力和变方位力的耦合公式,进一步把 O.K.мамедбеков 的研究结果推广到三维。

计算公式表明,钻头转动摩擦效应使增斜钻具产生左漂的变方位力增量;使降斜钻具产生右漂的变方位力增量。在井下动力钻具造斜时,将产生左漂的变方位力。

4. 对牙轮钻头结构右漂力的初步探讨

对牙轮钻头是否因结构原因存在右漂的变方位力,目前尚无定论。作者从某一口井钻压分析结果发现,在该井钻进中确实存在钻头结构右漂变方位力。本文假定了四种数学模式,最后得到了比较一致的结果:钻头结构右漂力约为 30kgf 左右。

对于这个问题,仅是进行初步探讨,还需要进一步做工作。

四、地层力的模式研究与实例验证

A.Lubinski 提出了地层各向异性指数 h 。他认为在各向同性地层中,钻头将按合力方向前进。这就隐含了钻头是切削能力各向同性的理想钻头的前提,但实际上这样的理想钻头并不存在。同时 A.Lubinski 主张从实钻资料求 h 值,而如此求得的 h 中必然包含钻头切削异性的影响,这样就导致出现矛盾。另外,后来的研究者在实验中发现 h 值是个变数,与转速和钻压有关,而且有时 h 高达 0.21,远远超出 A.Lubinski 提出的 h 为定值且 $h=0\sim 0.075$,这用原来的理论是难以解释的。

本文从实际钻头客观存在的对不同方向其切削能力不同这一事实出发,提出了钻头的切削指数和各向切削异性指数等概念,用以描述钻头切削能力在不同方向的差异,并推出了数学表达式。

在此基础上,本文考虑钻头各向切削异性、地层各向异性、地层倾角、井斜角、钻压、钻头倾角、体积破碎和表面破碎状况对地层自然造斜力的影响,推出了地层自然造斜力的普遍表达式,由此可推出各种简化条件下的相应计算公式。若令 $m=1$,可推出表面破碎阶段的地层自然造斜力,再令钻头各向切削异性指数 $\Delta K_n=0$,可求出理想钻头在表面破碎阶段的地层自然造斜力公式,即 Merphey-Cheatham's 公式。

本文提出了综合切削异性指数 H 的概念,并给出了数学表达式。它是综合反映钻头各向切削异性和地层各向异性的指标。从实钻资料求出的应是 H 值。这样较好地解释了原有理论不能解释的现象。

本文提出了“钻压圆锥”的概念,认为在定向井中,地层力并不同于地层自然造斜力,它还受井身方位与地层上倾方位之间夹角的影响。本文经过理论推导,得出了地层造斜力和地层变方位力的计算公式。

本文编制了求综合切削指数 H 、地层倾角 β 和地层上倾方位 ϕ_s 的软件,利用邻井稳斜资料和地层数据资料可计算确定 H 、 β 、 ϕ_s 。

本文举出了地层力方面的 7 个实例,用所导出的地层力公式可较好地解释现场观察到的有关地层作用的现象。对华北、辽河油田多口井例计算了地层造斜力和变方位力,列表比较计算结果和实钻结果,相符程度较高。

不少文献均指出:“当地层倾角小于 45° 时,井眼一般沿上倾方向偏斜;地层倾角大于 60° 时,井眼将顺着地层面下滑;而在 $45^\circ\sim 60^\circ$ 之间是不稳定区,即有时向上倾斜,有时向下倾斜”。但是,至今没有一种理论对此现象作出定量解释。本文用所提出的钻头各向切削异性指数理论与所导公式,定量计算并解释了上述现象,提出了临界地层倾角 β_c 概

念,并导出了计算 β_c 的方程式,作出了曲线,从理论上证明了 $\beta_c > 45^\circ$ 。

五、侧面切削模式的建立与实例计算

本文采用理论分析与实钻资料统计相结合的方法,建立了关于侧面切削量的数学模型,集中考虑了侧向力、机械钻速、转速、进尺、岩石强度等因素的影响。对于实际钻井过程,本模型可灵活地演化为四元模型、三元模型、二元模型等。

作为应用,本文采用四元非线性幂积模型对 K.K.Millheim 的侧切试验数据 (SPE7518) 进行处理,效果很好。经统计检验, F 比为 $F = 401.98$, 复相关系数 $R = 0.99783$, 剩余标准差 $S = 0.0150$, 精度很高。

本文对华北泉-95 井实钻资料(造斜段)建立三元幂积侧切模型。经统计检验,其 $F_{比} = 29.000$, 复相关系数 $R = 0.994$, 剩余标准差 $S = 0.081$, 精度较高。

另外,本文还对辽河油田 10^二平台 J66-44 井, J68-40 井的实钻资料建立了三元侧切模型,文中列出了详细的统计资料和建模数据。

利用由实钻资料得到的多元侧切模型,预测下一井段的井斜与方位,误差较小,准确度较高。

本文研制了处理实钻资料与建立侧切模型的计算软件。

六、井斜和方位的预测和控制

本文推导了井斜角、方位角、井斜变化率和方位变化率的预测公式。其基本预测方法是:通过钻具组合受力分析、地层力计算,并考虑井身曲率效应、钻头结构变方位力和转动摩擦效应的修正,求出作用于钻头上的总变井斜力(在 P 平面内),总变方位力(在 Q 平面内),以及钻压(沿井眼轴向),即得三个正交分力;通过实钻资料求出机械钻速和进尺,通过多元幂积模型求出 P、Q 两平面内的侧面切削量,即得三个正交位移;由此通过预测公式可求出井斜角增量和方位角增量,进而可预测井斜角、方位角、井斜变化率和方位变化率。

上述这种预测方法是建立在力学分析和一组数学模型的基础上,通过分析可发现每个参数对总预测结果的影响。如果预测结果超出允许范围,可通过参数分析和修正,以保证井身质量。通过已钻井的钻后分析,可积累必要的资料,逐步使预测结果比较准确。

作者用上述预测方法对华北泉-95 井、辽河油田 J68-40 井、J66-44 井造斜段的井斜和方位进行了轨道拟合与预测,其结果用数表和曲线表示,预测效果较好。例如对 J68-40 井,在 52m 长井段上,井斜拟合预测误差 0.2° , 预测误差率 $0.038^\circ / 10M$, 方位拟合预测误差 -1.1° , 预测误差率为 $-0.212^\circ / 10M$; 对 J66-44 井,在 30m 长井段上,井斜拟合预测误差 -0.33° , 预测误差率为 $-0.11^\circ / 10M$; 对泉-95 井,在 90m 长井段上,井斜拟合预测误差 0.075° , 预测误差率为 $0.0083^\circ / 10M$ 。

上述结果均是由研制的预测软件算出的。

但是,由于上述预测方法涉及到很多环节和很多资料,需要用软件包在计算机上实施运算,故一般多用于钻井的理论研究,方案分析和室内的钻后分析和钻前预测。在钻井现场,往往因某些资料欠缺而无法采用上述方法。为此,本文另外研制了适用于井场快速预测的钻前预测软件,即带有信号反馈的自适应信号跟踪预测软件。

在使用该预测软件时,只需要首先输入井身轨道上的两个实测点的井斜和方位(若没有已知数据,可以假设,程序在运算过程中会很快消除假设带来的误差),然后程序即可算出任一预测深度点的井斜角、方位角及其变化率的预测值。当钻至该点后,再把实测值输入程序,则预测值和实测值间的误差将被反馈,形成跟踪信号,从而使进一步的预测更趋准确。该预测软件有很强的自适应校正能力,且操作简单使用方便,在 PC-1500 机上即可运行。因此,很适于在井场用于钻前预测。该程序不需要其他预备资料,因此应用面广,不仅可用于井下动力钻具组合,而且还可用于其他增斜、稳斜和降斜钻具组合。

本文对辽河油田、华北油田、渤海公司、大港油田的 14 口井,进行了 25 例的井斜、方位预测。在绝大部分算例中预测趋势和实测趋势相当吻合,很多测点的预测值和实测值十分吻合。

图 1-5 和图 1-6 示出了两例井斜和方位的实测和预测的对比结果。实测值用圆圈表示,预测值用曲线表示。

七、CNS 钻具的设计与现场实验

为了减少起下钻次数、提高轨道质量、减少钻井时间、降低钻井成本,本文设计了 CNS 连续钻井导向钻具系统,它由 CNS 导向螺杆钻具、上满眼稳定器、定向直接头、随钻测斜仪和 PDC 钻头(或牙轮钻头)组成。

导向螺杆钻具是在国产 LZ165-I 型螺杆钻具的基础上,经过改进设计,使其本身形成两个共面弯角;在挠轴外壳上,装有专门设计的 SS244/165 型滑动稳定器。通过改变稳定器在挠轴壳体上的位置,即可改变 CNS 系统的力学性能,以调整造斜率,使之适应不同曲率的井身轨道设计。

通过导向螺杆钻具的双稳定器和双弯角结构,CNS 钻具组合将产生弹性变形,从而使钻头处产生侧向力,因而在转盘不转的条件下可进行造斜或扭方位操作。如果在开动螺杆钻具的同时再开动转盘,则可钻出稳斜井段。这样,使用 CNS 钻具系统,可以造斜、增斜、稳斜,而不用起下钻变更钻具组合。

本文研究了 CNS 钻具受力与变形的一维、二维、三维分析的计算方法,开发了相应的计算软件。通过大量方案计算,优化结构参数组合,并作图分析了结构参数对钻具性能的影响。

现场实验于 1987 年 12 月份在大港油田进行。由于无 PDC 钻头和随钻测斜仪,改用 $9\frac{5}{8}$ " P2 牙轮钻头和单点测斜仪。此次实验的目的在于验证导向螺杆钻具(包括滑动稳定器)的性能。经地面试验和井下空载循环泥浆,表明导向螺杆钻具性能良好;起下钻顺利;经两次实验室内拆、装和现场起下钻考验,表明滑动稳定器性能可靠。

由于某些意外的非技术性原因,该项实验暂时中断。关于该钻具的力学性能拟在今后再继续进行现场实验。

另外,作者还在国产 LZ165-I 型螺杆钻具基础上,研制了弯壳体螺杆钻具,目前已经运往油田,准备进行现场实验。

八、定向井轨道预测与控制软件包的组成和应用

本文在理论研究的基础上针对 IBM-PC 计算机, 开发了定向井轨道控制软件包, 它分为一个主控程序和 7 个不同功能的子模块, 共 44 个程序。其中大部分程序可在 PC-1500 袖珍计算机上执行, 为现场应用提供了方便。子模块分类如下:

- (1) 子模块 A: 动力钻具组合变形与受力分析模块 (内含 17 个程序)
- (2) 子模块 B: 转盘钻 BHA 变形与受力分析模块 (内含 4 个程序)
- (3) 子模块 C: 地层力分析与计算模块 (内含 4 个程序)
- (4) 子模块 D: 侧面切削建模分析计算模块 (内含 5 个程序)
- (5) 子模块 E: 定向井井身轨道拟合与预测模块 (内含 5 个程序)
- (6) 子模块 F: 辅助功能模块 (内含 7 个程序)
- (7) 子模块 G: 定向井井身轨道控制专用数据库 (内含 3 个子数据库)

应用上述软件包, 可进行: 各种动力钻具、转盘钻 BHA 在各种井身条件下的受力与变形分析、钻具组合优化设计、地层资料处理和地层力计算、井史数据处理和侧面切削建模计算、定向井轨道拟合与预测、钻后分析、辅助计算与绘图、数据库调用等工作。

九、结 论

1. 本文用纵弯曲法求解各种不同的井下动力钻具组合 (BS-DHM、带有稳定器的 BS-DHM, CNS 钻具组合) 和变截面 (变刚度) 井下钻具组合的受力和变形, 用于计算在各种不同的井身条件 (一维、二维、三维井身问题, 过渡井段) 下钻头的造斜力和变方位力, 为定向井井身轨道控制提供了静力分析基础; 同时扩展了纵横弯曲法的应用范围, 再次证明纵横弯曲法是一种运算速度快、求解精度高、适用面广、在微型计算机和袖珍计算机上均可运行的算法;

2. 弯接头-井下动力钻具的结构参数影响造斜力和变方位力, 其中影响最大的参数是下部钻柱组合长度 L_1 和弯接头弯角 γ 。如果缩短下部钻柱组合的长度, 或增大弯接头的弯角, 均可显著增大钻头侧向力。另外, 若增大弯接头直径、增加下部钻柱组合的抗弯刚度, 或减小第二跨钻铤的直径, 均可提高侧向力;

3. 井身参数影响井下动力钻具组合的造斜力和变方位力。井身曲率可显著降低造斜力。在三维井身中, 如果只改变造斜率 (或变方位率), 则钻具造斜力 (或变方位力) 相应发生改变, 但几乎不影响变方位力 (或造斜力)。井径扩大则造成钻头侧向力下降。对弯接头-井下动力钻具, 存在临界井斜角 (一般为 10° 左右), 在该点造斜力达到峰值;

4. 钻井工艺参数影响井下动力钻具组合的造斜力和变方位力。装置角对侧向力有显著影响。钻压对侧向力影响甚微, 但因钻压明显影响机械钻速和地层力, 所以, 它仍是显著影响井斜和方位的关键参数;

5. 本文从理论上探讨了井底实际钻压、摩擦力矩和反扭角的计算方法, 并考虑了井身曲率效应和钻头转动摩擦效应, 提出了进一步的修正公式, 使钻头造斜力和变方位力的计算值和实际结果更加接近;

6. 钻头转动摩擦效应使增斜钻具组合产生左漂方位力增量; 使降斜钻具组合产生右漂方

位力增量。当采用弯接头一井下动力钻具造斜时,产生左漂方位力增量;

7.本文所导出的井下钻压公式可用来计算定向井中的实际(静态)钻压值,井下实际钻压与井口指重表所示的钻压间的差值随着井斜角的增大而增大。在造斜的初始阶段(井斜角小于 6°),二者比较接近,当直井段短而相对曲井段较长(即井斜角较大)时,二者存在较大差异。计算实际钻压值对计算机钻速、分析地层力和钻柱受力、计算反扭角,乃至预测井身轨道是必要的;

8.钻柱与井壁的摩擦系数 μ 值影响反扭角。 μ 值增大导致反扭角减小。钻柱的轴力对反扭角有一定影响,轴力效应使摩擦阻力矩增大。反扭角的大小与钻压有关,且随进尺和井斜角的变化而变化。在造斜和增斜井段,摩擦阻力矩随进尺而增大,反扭角则随之变小。因此,应随着井深的增加而不断计算反扭角,调整装置角,以确保井眼按预定方位钻进;

9.本文提出了钻头切削各向异性指数、综合异性指数等概念,导出了适合于实际钻头、体积破碎和表面破碎状况的地层力普遍公式和在各种简化条件下的计算公式,导出了计算定向井中地层变方位力和地层造斜力的一组公式,为井身轨道控制提供了地层力分析基础;

10.定向井中的地层造斜力和变方位力,与井斜角、钻压、地层倾角、钻头各向切削异性指数,地层各向异性指数,井身方位与地层上倾方位的夹角有关。本文提出的钻头各向切削异性概念可用于计算临界地层倾角,为判断钻头可能沿上倾或下倾钻进(或处于不稳定区)的经验说法提供了一种定量的初步解释;

11.本文采用理论分析和实钻资料统计处理相结合的方法建立实钻过程的多元非线性侧面切削累积模型,为预测计算侧面切削量提供了一种有效方法。侧面切削量随侧向力的增大而增大,随机械钻速的增大而减小;

12.本文建立了井斜角、方位角、井斜变化率和方位变化率的基本预测公式,可用于轨道计算、钻后分析、轨道拟合与预测并研制了带有信息反馈的自适应信号跟踪预测软件,为现场钻井施工提供了一种快速、有效的钻前预测方法,适用于包括转盘钻、井下动力钻具在内的多种不同钻具组合和各种不同井身条件下的轨道预测;

13.本文研制的CNS钻具组合可望成为实现定向井连续钻井(造斜、增斜、稳斜、扭方位)的一种新型井下工具;

14.本文研制的定向井轨道预测与控制软件包,可为钻井科研、现场施工提供如下服务,即各种井下动力钻具的受力与变形分析、转盘钻BHA的受力与变形分析、钻具组合优化设计、地层资料分析处理和地层力计算、井史数据处理和侧面切削建模计算、定向井轨道的拟合与预测、钻后分析、辅助计算与绘图、数据库调用等;

15.对定向井轨道的控制主要应从如下方面着手:设计合理的钻具组合,选用合理的钻压,选用准确的装置角,选定合理的定向方位角。

附 录

(一) 关于弯接头弯角 γ 的两种等效处理方法

以二维井身为例,如图1-1,图1-2所示,可把BS-DHM自上切点T以下部分简化为双跨纵横弯曲连续梁(OBT), R_B 为井壁作用于钻头的侧向反力,

1.方法(1):如图1-1,

肘点B处连续条件 $\theta_B^R = -\theta_L$

上切点T处转角 $\theta_T = \theta^R = K(L_1 + L_2)$

其中 $\theta^R = \frac{q_1 L_1^3}{24EI_1} X(u_1) + \frac{M_1 L_1}{3EI_1} Y(u_1) + \frac{y_1 - y_0}{L_1}$

$$\theta^L = \frac{q_2 L_2^3}{24EI_2} X(u_2) + \frac{M_1 L_2}{3EI_2} Y(u_2) + \frac{M_2 L_2}{6EI_2} Z(u_2) - \frac{y_2 - y_1}{L_2} + \gamma$$

$$\theta^R = \frac{q_2 L_2^3}{24EI_2} X(u_2) + \frac{M_2 L_2}{3EI_2} Y(u_2) + \frac{M_1 L_2}{6EI_2} Z(u_2) + \frac{y_2 - y_1}{L_2}$$

2.方法 (2): 如图1-2,

肘点B处连续条件 $\Delta\theta^R = -\Delta\theta^L$

上切点T处转角 $\theta_T = \theta^R = K(L_1 + L_2)$

其中 $\theta^R = (\theta^R)_0 + \Delta\theta^R$

$$(\theta^R)_0 = \frac{KL_1}{2} + \gamma$$

$$\Delta\theta^R = \frac{q_1 L_1^3}{24EI_1} X(u_1) + \frac{M_1 L_1}{3EI_1} Y(u_1) - \frac{H_1}{L_1}$$

$$\Delta\theta^L = \frac{q_2 L_2^3}{24EI_2} X(u_2) + \frac{M_1 L_2}{3EI_2} Y(u_2) + \frac{M_2 L_2}{6EI_2} Z(u_2) + \frac{H_2 - H_1}{L_2}$$

$$\Delta\theta^R = \frac{q_2 L_2^3}{24EI_2} X(u_2) + \frac{M_2 L_2}{3EI_2} Y(u_2) + \frac{M_1 L_2}{6EI_2} Z(u_2) - \frac{H_2 - H_1}{L_2}$$

3.等效关系

$$\frac{y_1}{L_1} - \frac{y_2 - y_1}{L_2} = -(\gamma + \frac{H_1}{L_1} - \frac{H_2 - H_1}{L_2})$$

(二) 三维井身条件下空间几何参数的计算

$$K_p \approx K \cos \theta$$

$$K_Q \approx K \sin \theta$$

$$\gamma_p \approx \gamma \cos \Omega$$

$$\gamma_Q \approx \gamma \sin \Omega$$

其中 θ 为井身平面 R 与铅垂平面 P 间的夹角, Ω 为装置角 (如图 1-3, 图 1-4 所示)。

$$\theta = \arccos \left(\frac{\bar{n}_R \cdot \bar{n}_P}{|\bar{n}_R| \cdot |\bar{n}_P|} \right)$$

以上 $\bar{n}_R$, $\bar{n}_P$ 分别表示 R、P 两平面的法线矢量。

$$\bar{n}_R = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \sin \alpha_A \cos \varphi_A & \sin \alpha_A \sin \varphi_A & \cos \alpha_A \\ \sin \alpha_B \cos \varphi_B & \sin \alpha_B \sin \varphi_B & \cos \alpha_B \end{vmatrix}$$

$$\bar{n}_P = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \\ L_{AB} \sin \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \cos \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2} & L_{AB} \sin \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \sin \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2} & L_{AB} \cos \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \end{vmatrix}$$

(三) 在各种井身条件下 BS-DHM 受力分析的普遍方程

1.P 平面内

(1) 三弯矩方程组

$$\begin{cases} M_{0P}Z_P(u_{1P}) + 2M_{1P}\left[Y_P(u_{1P}) + \frac{L_2I_1}{L_1I_2}Y_P(u_{2P})\right] + M_{2P}\frac{L_2I_1}{L_1I_2}Z_P(u_{2P}) \\ = -\frac{q_{1P}L_1^3}{4}X_P(u_{1P}) - \frac{q_{2P}L_2^3I_1}{4L_1I_2}X_P(u_{2P}) \\ -\frac{6EI_1}{L_1}\left(\frac{Y_{1P}-Y_{0P}}{L_1} - \frac{Y_{2P}-Y_{1P}}{L_2} + \gamma_P\right) \\ q_{2P}X_P(u_{2P})L_2^3 + 4[2M_{2P}Y_P(u_{2P}) + M_{1P}Z_P(u_{2P})]L_2^2 \\ = 24EI_2[L_2(L_1+L_2)K_P - Y_{2P} + Y_{1P}] \end{cases}$$

$$(2) \text{ 钻头变井斜力 } R_{BP} = -\left(\frac{P_B Y_{1P}}{L_1} + \frac{q_{1P}L_1}{2} + \frac{M_{1P}-M_{0P}}{L_1}\right)$$

(3) 钻头倾角

$$A_{BP} = \frac{q_{1P}L_1^3}{24EI_1}X_P(u_{1P}) + \frac{M_{0P}L_1}{3EI_1}Y_P(u_{1P}) + \frac{M_{1P}L_1}{6EI_1}Z_P(u_{1P}) + \frac{Y_{0P}-Y_{1P}}{L_1}$$

2.Q 平面内

(1) 三弯矩方程组

$$\begin{cases} M_{0Q}Z_Q(u_{1Q}) + 2M_{1Q}\left[Y_Q(u_{1Q}) + \frac{L_2I_1}{L_1I_2}Y_Q(u_{2Q})\right] \\ + M_{2Q}\frac{L_2I_1}{L_1I_2}Z_Q(u_{2Q}) \\ = -\frac{6EI_1}{L_1}\left(\frac{Y_{1Q}-Y_{0Q}}{L_1} - \frac{Y_{2Q}-Y_{1Q}}{L_2} + \gamma_Q\right) \\ [2M_{2Q}Y_Q(u_{2Q}) + M_{1Q}Z_Q(u_{2Q})]L_2^2 \\ = 6EI_2[(L_1+L_2)K_Q - Y_{2Q} + Y_{1Q}] \end{cases}$$

$$(2) \text{ 钻头变方位力 } R_{BQ} = -\left(\frac{P_B Y_{1Q}}{L_1} + \frac{M_{1Q}-M_{0Q}}{L_1}\right)$$

(3) 钻头倾角

$$A_{BQ} = \frac{M_{0Q}L_1}{3EI_1}Y_Q(u_{1Q}) + \frac{M_{1Q}L_1}{6EI_1}Z_Q(u_{1Q}) + \frac{Y_{0Q}-Y_{1Q}}{L_1}$$