

博士研究生论文  
*Ph. D. Dissertation*

定向水平井钻柱拉力—扭矩模型、  
导向钻具大小挠度力学分析及轨迹控制理论

*A Steady Drillstring Tension and Torque Model in  
Directional/Horizontal Wells, Analysis of the Steerable  
Downhole Motor Assembly under Large and Small  
Deflections, Theory of Drilling Trajectory Control*

(申请博士学位论文)

学科专业：油气田开发工程

研究方向：井眼轨迹控制理论和技术

博士生：李子丰

导师：刘希圣 教授

石油大学(北京)

*University of Petroleum , Beijing*

一九九二年八月

## 提 要

综合考虑钻柱、井眼环境、作业过程和作业参数的影响，建立了更完善的钻柱稳态拉力和扭矩模型，并将其应用于确定钻柱与井壁的摩擦系数、计算大钩负荷和转盘扭矩、校核钻柱的强度和稳定性、优选井眼剖面、推算井下动力钻进的实际钻压和预测水平井段的最大可钻长度等定向水平井的科学计算中。

根据下部/导向钻具的实际受力状态，分别建立了下部/导向钻具的三维小挠度和三维大挠度静力分析的数学模型。选用加权余量、加权目标函数和最优化方法并借助于计算机确定了钻柱与井壁的切点位置，削弱了切点处边界条件不完全确定的影响，较为准确地计算出了钻具的受力和变形状态。在此基础上，分别研究了钻压、井眼的空间几何形状、下部/导向钻具的结构和装置角等参数在大、小挠度力学分析中对钻头的增井斜力和增方位力的影响规律。计算表明，大挠度与小挠度力学分析结果在大多数情况下存在着较为明显的差异。

考虑钻头各向异性、地层各向异性和地层产状的影响，改进了钻头和地层相互作用的 UPC 理论模型，并以矩阵的形式表达。同时，给出了利用实钻资料反演钻头各向异性指数和地层各向异性指数等参数的数学方法，并初步应用于 NMH-1 水平井的实际计算。

以井眼轨迹连续光滑为目标，将下部/导向钻具三维大、小挠度静力分析与钻头与地层相互作用模型相结合，建立了新的井眼轨迹预测方程。利用上述理论编制的计算机软件，既能定量地预测井斜角，又能定量地计算方位角。应用 NMH-1 水平井实钻轨迹对该方程进行了验证，结果令人满意。

# *A Steady Drillstring Tension and Torque Model in Directional/Horizontal Wells, Analysis of the Steerable Downhole Motor Assembly under Large and Small Deflections, Theory of Drilling Trajectory Control*

## **SUMMARY**

A more accurate steady drillstring tension-torque model has been established by taking into account of drillstring, wellbore condition, drilling operation and drilling parameters. This model has been used in scientific calculations of directional and horizontal wells, such as determining the friction factor between wellbore and drillstring, calculating the hook load and rotating torque, checking the strength and stability of drillstring, optimizing well trajectory, computing the WOB while drilling by downhole motor and predicting the maximum allowable length of horizontal section.

Three-dimensional static mathematical models of a bottom hole assembly/steerable downhole motor assembly under large and small deflections have been established separately. The force and deflection of drillstring have been accurately computed by using the method of weighted residuals, the weighted objective function and the method of optimization to calculate the tangency point and to reduce the effect of the indistinct tangency point conditions. The effects of the weight on bit, the borehole geometry, the geometry and tool face rotation of the bottom hole assembly /steerable down hole motor assembly, etc. on the bit building and azimuth force have been studied separately. There is significant difference between the result of large deflection analysis and the result of small deflection analysis.

An improved theoretical model of rock-bit interaction expressed by matrix has been established by taking into consideration the anisotropic drilling characteristics of both the formation and the bit as well as the geometry of the formation. A mathematical method to determine the anisotropic drilling characteristics of both the formation and the bit by using field data has been presented.

Based on the bottom hole assembly/steerable downhole motor assembly analysis and the rock-bit interaction model, a new well trajectory prediction model has been established by using smooth well trajectory as objective function. A computer program from this model can predict both the inclination and azimuth of borehole path. This program has been verified by the field data from NMH-1 horizontal well.

# 目 录

前 言 .....	1
绪 论 .....	2
第一节 定向水平井钻柱拉力和扭矩研究的目标和国内外研究概况 .....	2
第二节 定向水平井轨迹控制理论的研究目标和国内外研究概况 .....	3
第一章 定向水平井钻柱拉力—扭矩模型 .....	8
引 言 .....	6
第一节 定向水平井钻柱拉力—扭矩模型 .....	6
一. 影响钻柱拉力与扭矩的因素 .....	6
二. 基本假设 .....	6
三. 微分方程 .....	7
四. 边界条件 .....	10
第二节 钻柱拉力—扭矩模型的应用 .....	11
一. 确定钻柱与井壁的摩擦系数 .....	11
二. 预测/计算钻柱拉力, 扭矩及与井壁的压力 .....	13
三. 选择定向水平井剖面 .....	13
四. 确定井下动力钻具的实际钻压 .....	13
五. 确定水平井段最大长度 .....	18
第三节 小结 .....	22
第二章 导向钻具组合的权余法力学分析 .....	25
引 言 .....	25
第一节 下部/导向钻具组合小挠度权余法力学分析 .....	26
一. 下部/导向钻具组合小挠度力学分析的数学模型 .....	26
1. 参考坐标系 .....	26
2. 微分方程 .....	27
3. 导向钻具中弯角及装置角的数学处理 .....	28
4. 边界条件及连续条件 .....	31
二. 加权余量法 .....	33
1. 加权余量法的基本概念 .....	33
2. 试函数的选择 .....	34
3. 算例 .....	34
三. 下部/导向钻具组合小挠度加权余量法分析 .....	35
1. 下部/导向钻具小挠度力学分析的加权余量解 .....	35
2. 下部/导向钻具三维小挠度力学分析程序 .....	42
3. 参数研究 .....	43
四. 小结 .....	47
第二节 下部/导向钻具组合大挠度权余法力学分析 .....	61
一. 下部/导向钻具组合大挠度力学分析的数学模型 .....	61

1. 参考坐标系 .....	61
2. 微分方程 .....	61
3. 边界条件及连续条件 .....	63
二. 加权余量解与解析解的比较 .....	65
三. 下部/导向钻具组合大挠度加权余量法分析 .....	66
1. 下部/导向钻具大挠度力学分析的加权余量解 .....	66
2. 导向钻具组合三维大挠度力学分析程序 .....	70
3. 参数研究和大.小挠度计算结果的比较 .....	71
四. 小结 .....	72
 第三章 钻头与地层相互作用 .....	78
引 言 .....	78
第一 节 地层各向异性和钻头各向异性的描述 .....	78
第二 节 三维钻速方程 .....	79
第三 节 三维钻速方程的反演模型 .....	83
第四 节 小结 .....	84
 第四章 井眼轨迹控制理论及应用 .....	85
引 言 .....	85
第一 节 方法概述 .....	85
一. 地层各向异性指数和钻头各向异性指数的确定 .....	86
二. 井眼轨迹的预测与控制 .....	86
第二 节 微机程序 .....	86
第三 节 应用实例 .....	87
第四 节 小结 .....	92
 第五章 结论 .....	93
 附录 A 符号注释 .....	95
附录 B 井眼轨迹的微分几何量 .....	98
附录 C 两端铰支中心压杆的平面屈曲 .....	101
附录 D 非线性最小二乘最优化方法 .....	103
附录 E NMH-1水平井简况 .....	107
主要参考文献 .....	114
致 谢 .....	120

## 前 言

井眼轨迹优选、轨迹控制、钻进参数优选和井下问题的预测与诊断都是钻井工程学中的主要研究课题。长期以来，国内外有关学者和专家为解决这些课题做出了艰苦的努力，取得了丰硕的科研成果和施工经验。然而，由于问题的复杂性和新难题的不断出现，仍然有许多理论和技术问题急需解决。

根据我国石油工业发展的需要，“七五”期间国家集中专门力量对定向丛式井钻井技术进行了科技攻关，取得了丰硕成果，并进行了大规模推广，取得了可喜的经济效益，为“八五”期间发展定向水平钻井技术奠定了理论和实践基础。目前，我国的水平钻井工具和技术还不完善，急待加强。除了继承“七五”定向丛式钻井技术的成果、消化和吸收国外先进经验外，还必须组织专门力量对水平钻井中遇到的特殊课题进行研究和开发。为此，国家把水平钻井技术列为“八五”国家重点科技攻关项目。定向水平井钻柱拉力和扭矩的研究和井眼轨迹控制技术就是其中的两个最重要、理论难度最大的课题。本文在认真、全面地调研国内外研究情况的基础上，紧密结合上述国家科技攻关任务，着重在理论上对定向水平井钻柱拉力和扭矩、井眼轨迹控制理论开展了进一步的研究。本文的第一部分为定向水平井拉力和扭矩的理论模型和实际应用。本文的第二部分为定向水平井轨迹控制理论，主要包括导向钻具组合大、小挠度力学分析、钻头与地层相互作用及井眼轨迹预测方法。

## 绪 论

### 第一节 定向水平井钻柱拉力和扭矩研究的 目标和国内外研究概况

#### 一. 定向水平井钻柱拉力和扭矩研究的目标

在定向水平井和深井中, 由钻柱和井壁接触所产生的轴向阻力和扭矩损失对钻井作业有很大的影响, 甚至成为钻井成败的关键, 为此, 必须对钻柱的拉力和扭矩进行深入的研究。

先进的钻柱拉力和扭矩模型, 尤其在与先进的地面扭矩、大钩载荷、井底扭矩和钻压的测量仪器结合使用时, 可达到如下目的:<sup>[15]</sup>

1. 优选井眼轨迹, 使整个钻柱的摩擦阻力和扭矩损失最小;
2. 选择和校核地面设备, 优化钻柱设计;
3. 监测井下问题;
4. 指导下套管作业;
5. 确定钻柱与井壁的接触压力, 估计套管的磨损程度和键槽是否存在;
6. 决定是否改变泥浆性能;
7. 根据地面悬重计算钻头实际钻压.

#### 二. 定向水平井钻柱拉力和扭矩研究研究概况

定向井钻柱拉力—扭矩的研究起步较晚, 仅有近十年的历史, 但是理论发展迅速、推广快。<sup>[13][7][11][12][16][18][17]</sup>

定向井钻柱拉力—扭矩模型有两类: 软钻柱模型和硬钻柱模型。软钻柱模型应用较早、简单且有一定精度, 硬钻柱模型应用稍晚、复杂、精度高。

1983年 C.A.Johansick 考虑了定向井钻柱拉力、重力和井眼轨迹, 首先建立了定向井钻柱拉力—扭矩模型(软钻柱模型)<sup>[13]</sup>。此后, M.C.Sheppard<sup>[8]</sup>和E.E.Maidla<sup>[11]</sup>对该模型进行了改进。该类模型虽可以满足工程需要, 但有一个缺点---未考虑钻柱的刚度。

1987年, 美国 NL 公司何华山博士提出了硬钻柱拉力—扭矩模型<sup>[18]</sup>, 克服了软钻柱模型的缺点, 使该研究有了新的突破。

1988年以来, 大庆石油学院张建群教授分别将软钻柱模型和硬钻柱模型应用到大庆油田、辽河油田的定向井和水平井作业中, 取得了良好的效果。<sup>[8][3]</sup>

在钻柱与井壁的摩擦系数研究方面除上述研究者用数学模型和实测大钩载荷进行迭代计算外, 1990年 E.E. Maidla还应用动失水装置对井眼摩擦系数进行了室内研究<sup>[35]</sup>, 结果为0.2~0.3。

本文在何华山硬钻柱拉力—扭矩模型的基础上, 考虑了钻柱的运动状态、平衡条件

和钻井液的结构力、粘滞力, 建立了较为完善的稳态钻柱拉力-扭矩模型。

## 第二节 定向水平井轨迹控制理论的研究目标和国内外研究概况

### 一. 定向水平井轨迹控制理论的研究目标<sup>[48][50]</sup>

钻直井时的“防斜”, 钻定向丛式井、水平井时的按设计轨迹钻进和绕障、防碰等都是钻井工程的基本问题。要解决这些技术问题, 就必须进行井眼轨迹控制理论和技术的研究。

井眼的形成是钻头作用于地层的结果。钻头与地层的相互作用直接决定了井眼轨迹。钻头与地层的相互作用包括钻头的力学特性(取决于下部钻具结构的受力和变形)、钻头的结构特性和地层特性三个方面, 其中钻头的力学特性尤为重要, 是必须解决的课题。

钻柱处在充满钻井液的狭长井眼里工作, 其受力和变形是比较复杂的, 因此往往采用数值方法并借助于计算机来定量分析钻柱的静态和动态特性。钻头的力学特性主要取决于钻柱的下部组合(BHA), 因此, 在井眼轨迹控制理论中主要研究下部钻具组合的受力和变形。一个完善的下部钻具组合分析程序, 应具有如下功能:

1. 定量描述下钻具组合的受力和变形, 算出钻头与地层的作用力和钻头转角;
2. 确定稳定器和裸眼井壁或套管间的接触位置和接触力, 估计稳定器、套管的磨损率和井眼扩大率;
3. 计算下部钻具组合中的应力, 确定危险断面, 以便采取合适的措施;
4. 确定井下测量接头轴线与井眼中心方向的偏差, 校正测斜数据;
5. 选择底部钻具组合和钻进参数, 使钻头按设计方向钻进。

为了便于研究, 往往把一些有代表性的地层假设为横观各向同性或正交各向异性材料, 同时考虑钻头的各向异性特性, 建立一些比较合理的钻头与地层相互作用模型。该模型应具有如下功能:

1. 确定钻头的钻进方向, 预测井眼轨迹;
2. 钻后确定地层的各向异性钻井特性和钻头的各向异性钻井特性以及井眼轨迹失控的原因;
3. 优选底部钻具组合和钻进参数。

井眼轨迹控制理论的总目标就是充分合理地利用钻井工具, 既能有效地把实钻井眼轨迹控制在要求的范围内, 又能改善井身质量和降低钻井成本, 同时避免井下钻柱破坏事故。

### 二. 井眼轨迹控制理论的研究概况

关于井眼轨迹控制理论的研究, 至今为止已有四十多年的发展历史。在这个历史过程中, 国内外有关专家和学者从钻柱力学、钻头与地层相互作用等方面作了大量的工作, 取得了许多科研成果, 从而使井眼轨迹控制理论不断发展和完善。在五十年代和六十

年代, 人们以防斜为研究目标。进入七十年代以后, 随着定向井的发展, 研究目标开始移向定向井井眼轨迹控制问题。在定向井井眼轨迹控制中, 既要对井斜角进行控制, 又要对方位角进行控制。因此, 定向井水平井井眼轨迹控制问题是一个极为复杂的研究课题, 至今未得到圆满的解决。

美国专家 Lubinski 是研究井斜控制理论的著名学者和创始人。他从定量分析直井中钻柱的屈曲问题入手, 开创了钻柱力学研究的新局面。接着他与 Woods 合作, 首次以定量的关系发表了地层各向异性钻井理论。他主张充分利用地层的造斜性, 放宽对井斜角的控制, 以增大钻压、提高钻速和降低成本, 同时对井眼的曲率做出严格的限制, 以防止钻柱的疲劳破坏。Hoch 提出了井眼曲率比井斜角更为重要的观点, 提倡使用刚性满眼钻具, 强调近钻头稳定器在平衡钻头侧向力中的作用。Lubinski 等人对井斜控制理论的发展做出了重要贡献, 他们的科研成果对我国钻井界的影响很大。<sup>[58-59]</sup>

Walker 首先应用最小势能原理对常规下部钻具组合进行了两维分析, 继而与 Friedman 合作建立了钻柱静力三维小挠度力学分析的数学模型, 并用微分方程理论和加权余量法对数学模型进行了近似求解<sup>[22]</sup>。Walker 把下部钻具组合三维分析程序应用于下部钻具组合的设计, 从而提高了钻速, 降低了钻井成本。

Tulsa 大学首次把有限元方法用于定向井下部钻具组合的二维和三维力学分析中。马德坤教授在 Tulsa 大学访问期间对钻头和地层相互作用问题进行过实验研究, 初步探讨了牙轮钻头的侧向切削机理。Brakel 则对下部钻具组合的动态特性进行了有限元分析。<sup>[60]</sup>

在 Rice 大学, Cheatham 等人侧重于钻头与岩石相互作用研究。他们先对楔型齿作用下的横观各向同性岩石进行了塑性极限分析, 接着进行了 PDC 单齿实验研究, 后来建立了钻头与地层相互作用的三维理论模型。<sup>[24]</sup>

在美国 Amoco 公司, 以 Millheim 为代表的一批研究人员, 围绕井眼轨迹控制问题所进行的研究工作是引人注目的。他们用有限元法对 BHA 进行静力分析以后, 率先研究了 BHA 的动态特性及其对井眼轨迹的影响。<sup>[25]</sup>他们以钻头机械侧向力为依据, 设计了适用于钻不同软硬地层的各种下部钻具组合, 并对它们的造斜特性进行了评估。

Callas 等人也对下部钻具组合进行了两维分析, 并采用平衡曲率法定量预测井眼轨迹。他们还提出了钻头弯矩理论, 以表达地层因素对井斜的影响。

美国 NL 公司何华山等人的研究也非常出色。何华山首次建立了钻柱静力大挠度控制方程<sup>[61]</sup>, 并使用有限差分法求其数值解。他还建立了一个钻头与地层相互作用的矢量模型<sup>[10]</sup>, 从而确定了钻进方向与钻头的合力、钻头指向及地层法向之间的一种数学关系。他的这些成果具有较先进的学术水平。

在国内, 井眼轨迹控制理论的研究起步较晚, 八十年代初的水平还相当低。理论研究工作是从唐俊才等人修正“霍奇公式”开始, 接着便是以白家祉为代表的一批专家和学者, 在八十年代, 特别是七五期间做出了巨大的努力, 取得了许多可喜的研究成果, 为井眼轨迹控制理论的发展做出了重要贡献。

白家祉教授应用三弯矩方程分析下部钻具组合的受力和变形<sup>[38-42]</sup>, 指导钻井实践, 并用理论分析结果指导井下定向控制工具的研制工作。他和他的研究生提出了一个地层力的公式, 用于计算地层对井斜的影响效果。尽管白教授和他的博士生试图用三弯

矩方程对BHA三维问题做出解答<sup>[41]</sup>, 但是, 由于方法的限制, 他们在求解过程中不得不忽略扭矩的影响, 以实质上的两维分析告一结果。

杨勋尧以解决防斜打直为目标, 通过求解简单的力学模型, 提出了设计下部钻具组合的实用方法。他也提出了一个地层造斜力公式, 以表达地层的各向异性对井斜的影响。

石油勘探开发科学研究院、石油大学(北京)、西南石油学院和大庆石油学院分别用有限元法对下部钻具组合进行了静动态小挠度力学分析。

高德利在刘希圣教授指导下, 应用加权余量法完成了下部钻具组合的三维小挠度力学分析, 并对二、三维大挠度问题进行了探讨, 并提出了一个钻头与地层相互作用的三维钻速方程<sup>[48-483C803]</sup>。张建群和闫铁则以矩阵的方式提出了另一个类似的三维钻速方程<sup>[583]</sup>。周大千在钻头与地层相互作用方面也做出了积极的贡献。

此外, 国内外其他专家或学者从不同的方面促进了井眼轨迹控制理论的发展, 本文就不作详细的介绍了。

总之, 我们在认真调研的基础上, 对井眼轨迹控制理论的研究现状做出如下结论:

1. 在钻头与地层相互作用方面, 虽然已经建立了若干定性和三维定量理论, 但远未达到理想的程度。其中

(1). 有关钻柱力学的研究成果比较多, 底部钻具组合受力分析发展到三维动态模型和几何非线性模型。然而钻柱力学的研究仍不完善, 力学模型尚有改进的必要, 所采用的多样化分析方法和计算方法有待优选, 还有许多细节问题需进一步推敲。

(2). 对于钻头的各向异性钻井特性和地层的个向异性钻井特性和地层产状虽进行过某些研究, 但是还缺少全面的认识和深入的了解, 给理论的应用带来一些困难。

2. 在井眼轨迹控制理论应用方面, 目前已初步达到对井眼轨迹进行定量预测和控制计算, 但是由于模型简单、原始数据不准或短缺等原因, 实际效果仍不理想。今后软件的研究应伴随理论模型的发展进一步探讨新算法, 以期研制出更符合实际需要的软件, 有效地进行钻前轨迹预测、钻进中的控制计算和钻后分析。

本文的研究主要在导向钻井系统的大、小挠度力学分析方面有所创新和突破, 同时以矩阵的形式建立了一个在理论上更完善的钻头与地层相互作用模型。最后提出了一个最切合实际的井眼轨迹预测方程。

# 第一章 定向水平井拉力-扭矩模型

## 引言

在 C.A. Johansick 建立的软钻柱拉力-扭矩模型中应用了皮带轮传递原理, 考虑了钻柱的拉力、钻柱浮重、井斜角和方位角及其变化, 但忽略了钻柱的刚度、钻柱的运动状态和钻井液的粘滞力和结构力的影响, 往往低估钻柱的轴向阻力和扭矩损失, 或者过高地估计摩擦系数, 有时计算结果会出现谬误。何华山提出的刚性拉力-扭矩模型应用弹性力学理论不但考虑了钻柱的拉力、浮重、井斜角、方位角, 而且考虑了钻柱的刚度、剪力和弯矩, 但仍未考虑钻柱的运动状态和钻井液的粘滞力和结构力的影响, 还会产生谬误。刚性拉力-扭矩模型虽然还不完善, 但比软钻柱拉力-扭矩模型更符合实际。

本在文何华山的刚性拉力-扭矩模型的基础上, 综合考虑了钻柱、井眼轨迹和井眼状态, 特别是计入钻柱的运动状态和钻井液的结构力和粘滞力的影响, 建立了钻柱稳态拉力-扭矩模型, 并将此新模型应用于水平井钻井作业中。

### 第一节 定向水平井钻柱拉力-扭矩模型

#### 一. 影响钻柱拉力和扭矩的因素

影响钻柱拉力和扭矩的因素可分为钻柱的构成、井眼环境和作业过程及其参数三类。

钻柱的构成包括钻柱的尺寸、形状和安放位置及钻柱的材质。

井眼环境包括井眼空间形状(直径、井深、井斜角、方位角、曲率、挠率等), 钻柱与井壁的接触状态、接触力、摩擦系数, 钻井液粘度、切力。

作业过程可分为起钻、下钻、井下动力钻进和旋转钻进四种, 其工程参数主要包括起下钻速度、钻压和转速。

钻柱及其所处的井眼环境可用于建立拉力与扭矩的微分方程, 而作业过程及其工程参数则确立了定解条件。

#### 二. 基本假设

为了建模方便, 作如下假设:

1. 井壁呈刚性;
2. 钻柱与井壁均匀接触, 钻柱中心与井眼中心一致;
3. 泥浆密度为常数, 宾汉流体;
4. 摩擦系数在某一口井 或某一井段为常数;
5. 钻柱中动载不大, 略去。

### 三. 微分方程

为了表达方便, 建立直角大地坐标系  $O'NED$  和直角伴随三棱形随动坐标系  $ptnb$  (参见图1-1)。其中 N 轴向北、E 轴向东、D 轴向下;  $\vec{t}$  为井眼切线方向的单位矢量,  $\vec{n}$  为主法线方向的单位矢量,  $\vec{b}$  为副法线方向的单位矢量。图1-2为微元钻柱受力分析图。

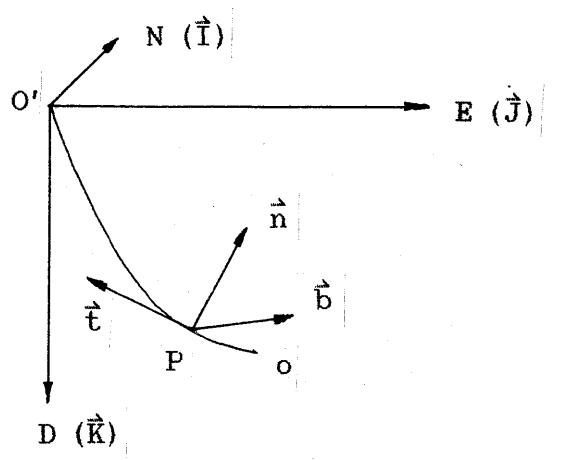


图1-1 直角大地坐标系和直角伴随三棱形随动坐标系

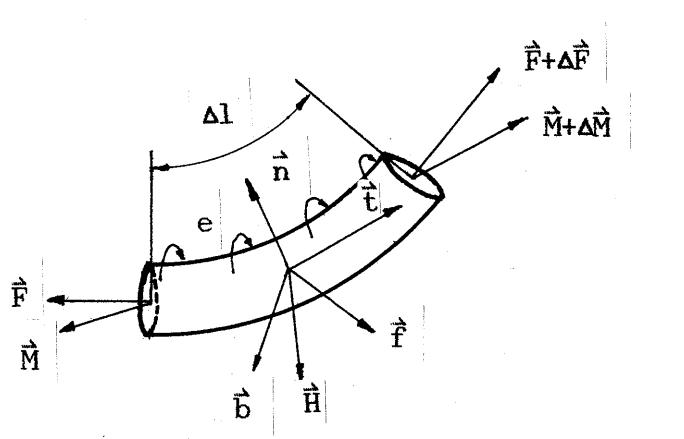


图1-2 微元钻柱受力分析图

通过钻柱的力平衡方程

$$\frac{d\vec{F}}{dl} = -\vec{H} - \vec{f} \quad (1.1)$$

和力矩平衡方程

$$\frac{d\vec{M}}{dl} = \vec{F} \times \vec{t} + \vec{e} \vec{t} \quad (1.2)$$

和费雷内公式<sup>[88]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dt}{dl} = K_b \vec{n} \\ \frac{dn}{dl} = -K_b \vec{t} + K_n \vec{b} \\ \frac{db}{dl} = -K_n \vec{n} \end{cases} \quad (1.3)$$

可以导出钻柱拉力-扭矩微分方程组

$$\begin{cases} \frac{dM_t}{dl} = f_1 r N + m_0 \\ \frac{dT_t}{dl} + EI K_b \frac{dK_b}{dl} - f_2 N - CV - B + Pk \cdot \vec{t} = 0 \\ -EI \frac{d^2 K_b}{dl^2} + K_b T_t + EI K_n^2 K_b + K_b K_n M_t + N_n + f_1 N_b + Pk \cdot \vec{n} = 0 \\ -\frac{d}{dl} (EI K_n K_b + K_b M_t) - EI K_n \frac{dK_b}{dl} + N_b - f_1 N_n + Pk \cdot \vec{b} = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

式中

$$\vec{F} = T_t \vec{t} + F_n \vec{n} + F_b \vec{b}$$

$$\vec{M} = -M_t \vec{t} + M_b \vec{b} = -M_t \vec{t} + EI K_b \vec{b}$$

$$\vec{H} = Pk$$

$$\vec{f} = -f_2 N \vec{t} + (N_n + f_1 N_b) \vec{n} + (N_b - f_1 N_n) \vec{b}$$

$$\vec{e} = -(f_1 r N + m_0)$$

$$f_1 = \frac{2\pi r \omega_0}{[V^2 + (2\pi r \omega_0)^2]^{1/2}} f$$

$$f_2 = \frac{V}{[V^2 + (2\pi r \omega_0)^2]^{1/2}} f$$

$$N = (N_b^2 + N_n^2)^{1/2}$$

$$m_0 = 4\pi^2 r^3 \omega_0 [ \frac{\tau_0}{(V^2 + (2\pi r \omega_0)^2)^{1/2}} + \frac{2\mu}{D_w - 2r} ]$$

$$B = \frac{2\pi r \tau_0 V}{[V^2 + (2\pi r \omega_0)^2]^{1/2}}$$

$$C = \frac{2\pi\mu}{\ln D_w - \ln(2r)}$$

$F$  —— 钻柱内力

$H$  —— 单位长度钻柱体积力

$f$  —— 单位长度钻柱表面力

$M$  —— 钻柱内力矩

$l$  —— 钻柱长度, 钻头处为起点

$e$  —— 单位长度钻柱的分布摩擦扭矩

$K_b$  —— 钻柱曲率

$K_n$  —— 钻柱挠率

$E$  —— 钻柱材质的弹性模量

$r$  —— 钻柱半径

$I$  —— 钻柱抗弯截面模量

$P$  —— 钻柱的线浮重

$N$  —— 钻柱与井壁的线接触压力

$N_b$  ——  $N$ 在**b**方向的分量

$N_n$  ——  $N$ 在**n**方向的分量

$T_t$  —— 钻柱轴向力

$M_t$  —— 钻柱扭矩

$V$  —— 起钻或上行速度

$\omega_0$  —— 钻柱圆频率

$\tau_o$  —— 钻井液的结构力

$\mu$  —— 钻井液的动力粘度

$f$  —— 钻柱与井壁的摩擦系数

$D_w$  —— 井经

$M_b$  —— 钻柱内弯矩

#### 四. 边界条件

(1.4) 为一常微分方程组, 若求某一作业过程中钻柱内的拉力、扭矩、钻柱与井壁的接触压力、确定井底动力钻进的实际钻压或摩擦系数等参数, 则需根据作业过程给出相应的边界条件。

##### 1. 计算钻柱的拉力、扭矩及其与井壁的接触压力

在此计算过程中, 钻柱组合、井眼轨迹、摩擦系数、作业过程等都是已知参数, 下面就针对不同的作业过程给出相应的边界条件。

###### (1) 起下钻过程

在起下钻过程中, 钻柱不旋转, 只有轴向运动, 钻柱下端的拉力和扭矩为零:

$$\begin{cases} T_t(0) = 0 \\ M_t(0) = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

###### (2) 转盘钻进

在转盘钻进时, 钻柱边旋转边向下缓慢运动; 钻柱下端的拉力和扭矩分别与钻压和钻头所受扭矩相等:

$$\begin{cases} T_t(0) = -WOB \\ M_t(0) = TOB = f(WOB) \end{cases} \quad (1.6)$$

###### (3) 井下动力钻进

在用井下动力钻具钻进时, 除靠近钻头的一段钻柱外, 绝大部分钻柱不旋转, 仅缓慢向下运动; 靠近钻头的一段钻柱在向下缓慢运动的同时, 还有反转的趋势。钻柱下端的压力等于钻压, 扭矩等于钻头上的扭矩:

$$\begin{cases} T_t(0) = -WOB \\ M_t(0) = TOB \end{cases} \quad (1.7)$$

##### 2. 确定井下动力钻进的实际钻压

在用井下动力钻进时, 一般都靠泵压的变化估算钻压。钻柱拉力与扭矩微分方程(1.4)建立后, 就可根据指重表读数计算大钩负荷, 再利用(1.4)计算实际钻压。

井下动力钻进时, 大钩负荷与指重表读数间的关系为

$$WOH = WOG \frac{(1-\eta^n)\eta}{(1-\eta)\eta} \quad (1.8)$$

其中

WOH —— 大钩负荷

WOG —— 指重表读数

n —— 提升系统有效绳数

$\eta$  —— 单个滑轮的传递效率

至此, 确定井下动力钻进的实际钻压的边界条件为

$$\begin{cases} T_t(L) = WOH \\ M_t(L) = 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

其中 L 为钻柱全长或井深。

### 3. 确定摩擦系数

井眼表面状况的各向异性导致起钻、下钻和旋转钻进的摩擦系数不同。这三个摩擦系数既可通过室内测得，也可通过起下钻过程中的大钩负荷和旋转钻进时的转盘扭矩利用数学模型进行迭代计算获取。迭代计算时的边界条件如下。

#### (1) 确定起钻或下钻摩擦系数的边界条件

$$\begin{cases} T_t(0) = 0 \\ M_t(0) = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

$$\begin{cases} T_t(L) = WOH \\ M_t(L) = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

下钻时，大钩负荷由(1.8)式计算，而起钻时，则由下式计算：

$$WOH = WOG \cdot \frac{1-\eta^n}{(1-\eta)\eta^n n} \quad (1.12)$$

#### (2) 确定旋转摩擦系数的边界条件

$$\begin{cases} M_t(0) = TOB \\ T_t(0) = -WOB \end{cases} \quad (1.13)$$

$$\begin{cases} M_t(L) = TOR \\ T_t(L) = WOH \end{cases} \quad (1.14)$$

其中 TOR 为作用在转盘上的扭矩，WOH 由(1.8)计算。

## 第二节 钻柱拉力与扭矩模型的应用

由于拉力与扭矩模型提供了钻柱的拉力、扭矩和与井壁的接触压力，在钻井设计和施工中具有广泛、重要的用途，例如改进井眼剖面，校核选择钻柱设计和地面设备，判断井下问题，改进下套管作业，判断实际钻压，判断震击器工作时的多余拉力等。下面结合NMH-1水平井应用钻柱拉力与扭矩模型。

### 一、确定钻柱与井壁的摩擦系数

根据“八五”攻关项目的需要，从造斜开始，我们在NMH-1水平井现场较详细地采集了指重表读数、井眼轨迹、钻具、钻压等工程参数(见附录E)。利用这些参数和计算机软件对NMH-1井的钻柱与井壁的摩擦系数进行了反求，结果列于表1-1和表-2中。

表1-1 NMH-1三开摩擦系数

日期	钻头位置 (M)	指重表读数(KN)		大钩负荷(KN)		摩擦系数	
		上提	下放	上提	下放	上提	下放
91.10.27	2486	--	765	--	649	--	.148
91.10.28	2590	870	--	1044	--	.267	--
91.11.2	2722	950	--	1134	--	.3	--
91.11.4	2705	--	860	--	730	--	.182
91.11.8	2815	1090	930	1317	781	.252	.141
91.11.16	2887	1050	800	1246	679	.226	.226
91.11.19	2949	1070	830	1270	704	.204	.204
91.12.12	3057	1220	880	1448	747	.282	.148
92.1.24	3173	1220	730	1448	619	.275	.249

上提摩擦系数:最大 0.300, 最小 0.204, 平均 0.258

下放摩擦系数:最大 0.249, 最小 0.141, 平均 0.185

表1-2 NMH-1四开摩擦系数

日期	钻头位置 (M)	指重表读数(KN)		大钩负荷(KN)		摩擦系数	
		上提	下放	上提	下放	上提	下放
92.3.14	3141	1050	770	1246	654	.263	.197
92.3.20	3185	1140	750	1353	637	.282	.234
92.3.23	3210	1080	750	1282	637	.232	.23
92.3.27	3080	1020	870	1210	738	.211	.141
92.3.30	3274	1080	810	1294	688	.226	.182
92.4.2	3284	--	740	--	628	--	.252
92.4.2	3291	1140	800	1353	679	.252	.185
92.4.3	3314	1140	780	1353	662	.245	.219
92.4.8	3350	1140	770	1353	654	.241	.219
92.4.11	3384	1020	780	1211	662	.182	.183
92.4.17	3468	1160	760	1377	645	.249	.211

上提摩擦系数:最大 0.282, 最小 0.182, 平均 0.24

下放摩擦系数:最大 0.252, 最小 0.140, 平均 0.206

研究发现,(1)套管内的摩擦系数明显低于全井平均摩擦系数或裸眼井段摩擦系数;(2)井眼的摩擦系数与测量前的作业密切相关。例如:92年3月27日的摩擦系数是起钻至套管内时取得的,明显低于其它数值;4月2日下钻时下放摩擦系数为.252,而下钻至井底上提下放几次后,下放摩擦系数减至.185;4月11日数据也是在活动几次钻具后测得的,摩擦系数比较低。

## 二. 钻柱轴向拉力与扭矩的计算

根据 NMH-1井井眼轨迹、钻具和钻压等参数,利用计算机软件,我们对该井钻具的受力状态进行了计算,并将部分结果列于表1-3和图1-3、图1-4中。计算结果的准确性主要取决于摩擦系数是否合适。从表1-3可以看出,利用平均摩擦系数(三开上提0.258,下放0.185;四开上提0.24,下放0.206)计算的大钩负荷值的相对误差小于10%。根据计算,NMH-1井中80~90%的转盘扭矩或功率耗费在使钻柱旋转上。从图1-3和图1-4可以看出,在造斜段钻柱与井壁的接触压力最大、旋转钻进时的扭矩消耗最大、起下钻时轴向摩擦阻力最大;在井眼上部,虽然井眼曲率不大,但由于轴向拉力大,钻柱与井壁的侧向压力却不小。在旋转钻进时,摩擦阻力主要使钻柱扭矩增加,在轴向上的分力几乎为零,不存在无法加钻压的问题。另外,利用NMH-1井的摩擦系数对树平1井的大钩负荷进行了计算,误差在3%以内,说明这两口井的摩擦系数相近。

## 三. 确定井下动力钻进的实际钻压

根据井眼轨迹、钻具组合、指重表读数和下放摩擦系数,利用计算机软件,可以计算出井下动力钻进的实际钻压。例如:NMH-1井钻至井深3362M时,指重表读数754KN,计算得钻压约40KN;若指重表读数为773KN,则钻压约为20KN。钻柱受力状态见图1-5。

## 四. 选择定向水平井剖面

满足地下、地面和钻井技术条件的定向水平井剖面不是唯一的,在设计时就需对定向水平井剖面进行优选。定向水平井钻柱拉力与扭矩分析程序就可用于该优选过程中对钻柱的力学和能耗指标进行评价,从而设计出既经济又安全的井眼剖面。下面就NMH-1井的原设计、参考设计(用导向钻具一次造斜至水平段)和实钻剖面进行对比分析。

从表1-4看出,参考设计比原设计井深小176M,造斜段短580M,狗腿严重度大2倍;实钻轨迹比原设计井深小33M,造斜段长35M,狗腿严重度大2倍。由于参考设计用导向钻具造斜,造斜率稳定,易于控制,在综合上述因素,认为参考设计优于原设计,原设计还优于实钻轨迹。

从表1-5看出,参考设计起下钻时的摩擦阻力最小,原设计次之,实钻轨迹最大;参考设计的转盘扭矩最小,原设计次之,实钻轨迹最大。从摩擦力和扭矩损失来看,若井眼按参考设计钻进,可节约大量的时间、资金和材料。

综合上述分析,参考设计最优,原设计次之,实钻轨迹不理想。

表1-3 NMH-1井大钩负荷计算及其误差

井深 (M)	作过 业程	摩擦 系数	大钩负 荷				转 盘 扭 矩
			计算值 (KN)	实测值 (KN)	绝对误差 (KN)	相对误差 (%)	
2815	上 提	.258	1329	1317	12	.9	0
	下 放	.185	742	781	39	5.0	0
	旋转钻进	.22	717				15.8
2950	上 提	.258	1382	1270	112	8.8	0
	下 放	.185	713	704	9	1.3	0
	旋转钻进	.22	730				17.8
3173	上 提	.258	1436	1448	12	0.82	0
	下 放	.185	671	730	59	8.1	0
	旋转钻进	.22	702				18.8
3274	上 提	.24	1314	1294	20	1.5	0
	下 放	.206	650	688	38	5.5	0
	旋转钻进	.223	683				17.6
3468	上 提	.24	1338	1377	39	2.8	0
	下 放	.206	628	645	17	2.6	0
	旋转钻进	.223	745				18.9
树平 1 2115	上 提	.24	700	680	20	2.9	0
	下 放	.206	487	480	13	2.7	0

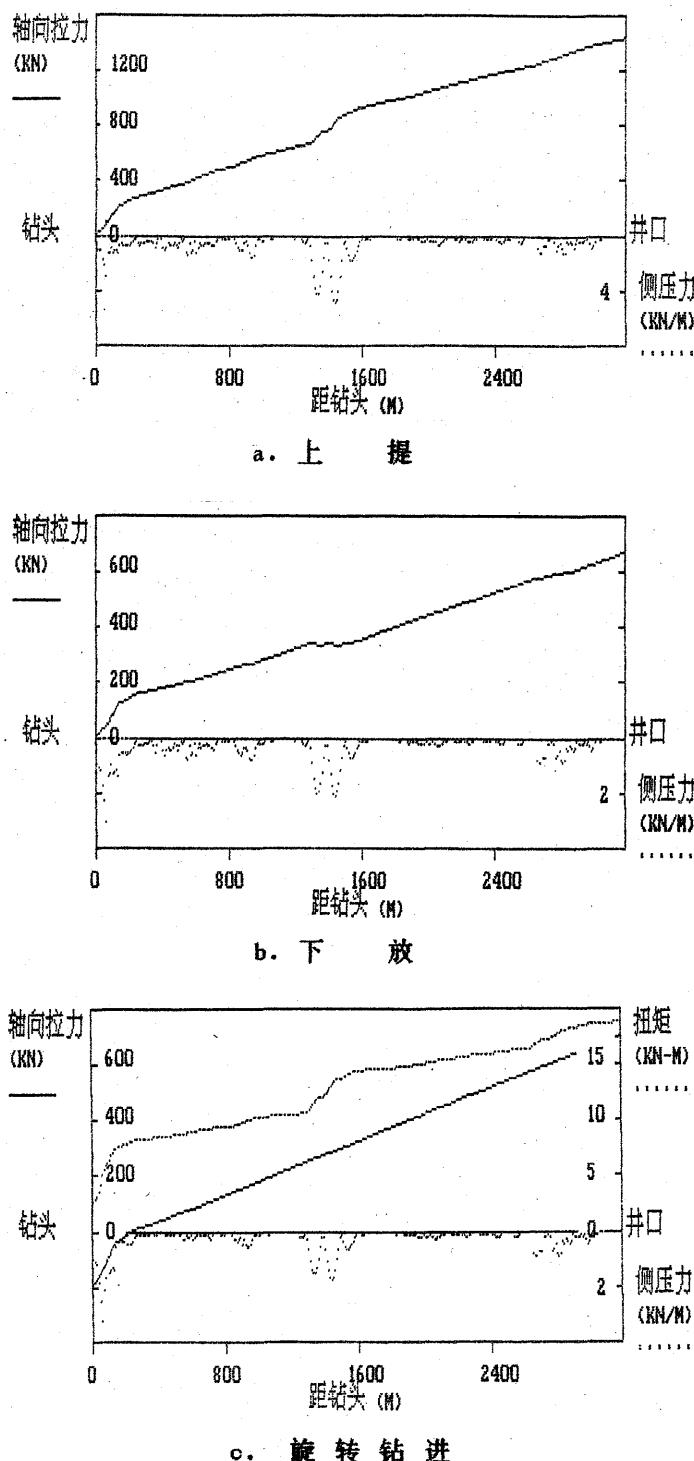


图 1-3 钻至3173米钻柱受力状态

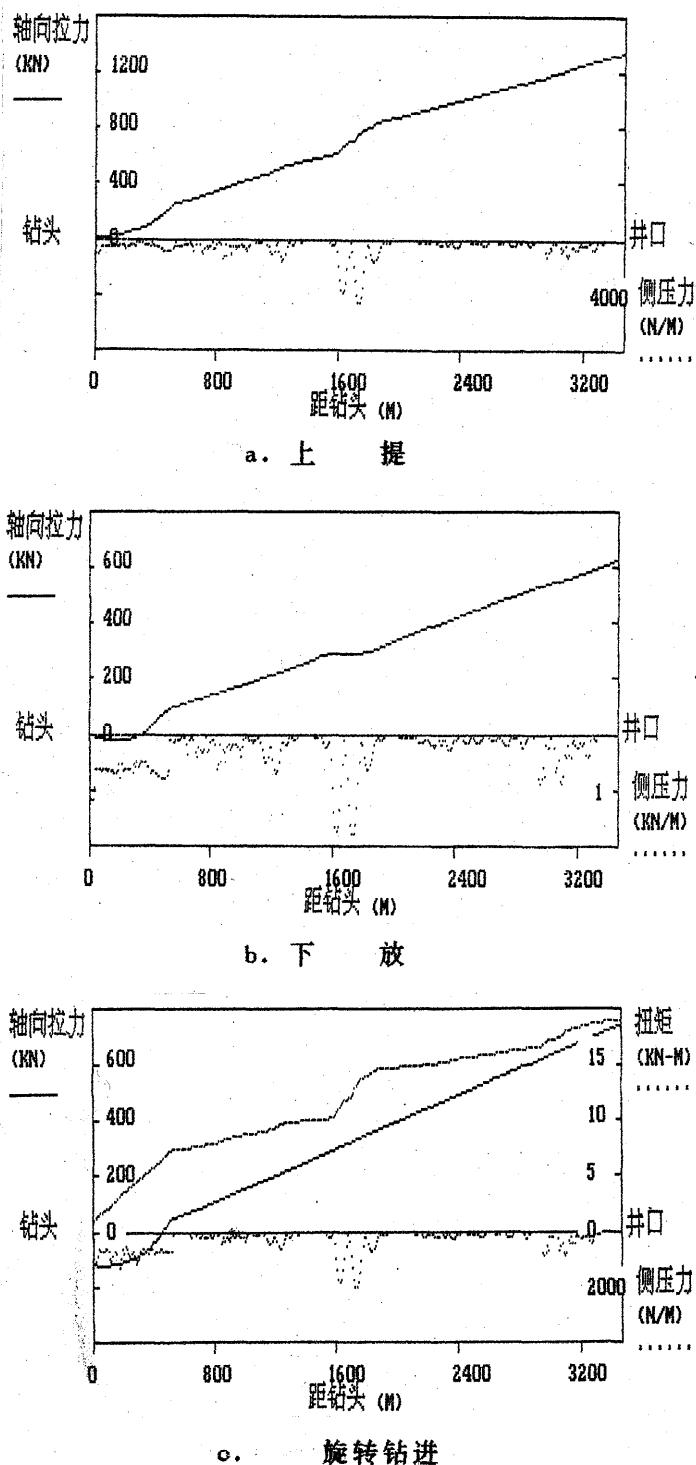
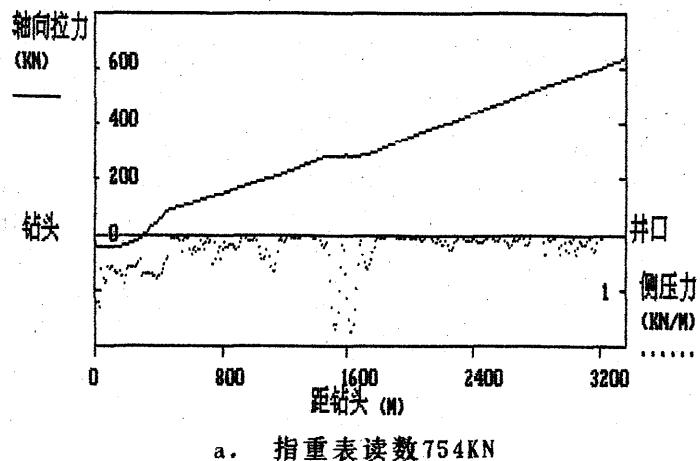
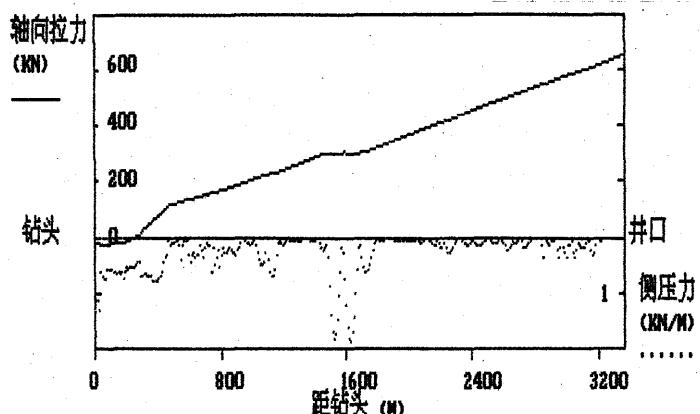


图 1-4 钻至 3468 米钻柱受力状态



a. 指重表读数 754 kN



b. 指重表读数 773 kN

图 1-5 井深 3362M 动力钻具钻进时钻柱受力状态

表 1-4 NMH-1 的原设计、参考设计和实钻剖面几何参数

剖面	井深 (M)	直井 段长 (M)	第一造斜段		稳斜 段长 (M)	第二造斜段		水平 段长 (M)
			段长 (M)	狗腿 °/10M		段长 (M)	狗腿 °/10M	
原设计	3696	2450	658	1	65	222	1	300
参考设计	3520	2920	300	3	0	0	0	300
实钻轨迹	3663	2450	650	<=1.7	0	263	<=3.0	300

表1-5 NMH-1 的原设计、参考设计和实钻剖面的钻柱受力

剖面	上 提		下 放		旋转钻进		空 转	
	大钩 负荷 (KN)	摩擦 力 (KN)	大钩 负荷 (KN)	摩擦 力 (KN)	大钩 负荷 (KN)	转 盘 扭 矩 KN·M	大钩 负荷 (KN)	转 盘 扭 矩 KN·M
原设计	993	178	681	134	695	11	815	9.7
参考设计	1013	93	823	97	800	8.5	920	5.9
实钻轨迹	1368	503	631	234	745	19	865	21

### 五. 确定水平井段最大可钻长度

水平井的主要优点之一就是可以有效地增加与油层特别是薄油层或/和具有垂直裂隙的油层的泄油面积，增加产量和采收率。在地质条件具备的前提下，水平井段越长，油井产量和采收率就越高，经济效益就越好。但水平井段的可钻长度受钻机、钻具和钻井技术水平的限制。确定水平井段的最佳长度是一个待研究的课题。下面就在钻机和钻井技术具备的前提下，从钻柱强度和稳定性两方面确定水平井段最大可钻长度。

#### 1. 钻柱强度条件

在起下钻、钻进和处理事故等作业中，钻柱不但不允许屈服，还要具有一定的剩余强度。若用安全系数表示，则为

$$A_q = \frac{\sigma_s}{(\sigma_t^2 + 4\tau^2)^{1/2}} \geq A_{q0} \quad (1.15)$$

式中

$A_q$  —— 安全系数

$\sigma_s$  —— 钻柱材料的屈服强度

$\sigma_t$  —— 钻柱的轴向应力

$\tau$  —— 钻柱的剪切应力

$A_{q0}$  —— 最小安全系数，一般为 1.5

#### 2. 稳定条件

对钻柱失稳后的状态和失稳条件已进行了较深入的研究<sup>[21][25][27][28][31][32]</sup>。从理论上讲，钻柱屈曲有正弦弯曲和螺旋弯曲两大类，并导出了相应的失稳载荷，实验研究得到的失稳载荷与螺旋弯曲的失稳载荷接近。为此，认为钻柱的弯曲主要采取螺旋弯曲形式，其失稳载荷

$$F_{cr} = 2.85(EI)^{0.504} P^{0.496} [2\sin\alpha/(D_w - D_o)]^{0.511} \quad (1.16)$$

当钻柱所承受的轴向压力大于  $F_{cr}$  时钻柱就失稳。钻柱失稳后会迅速增加与井壁的接触压力、摩擦力和钻柱内部的应力，一般应绝对避免。

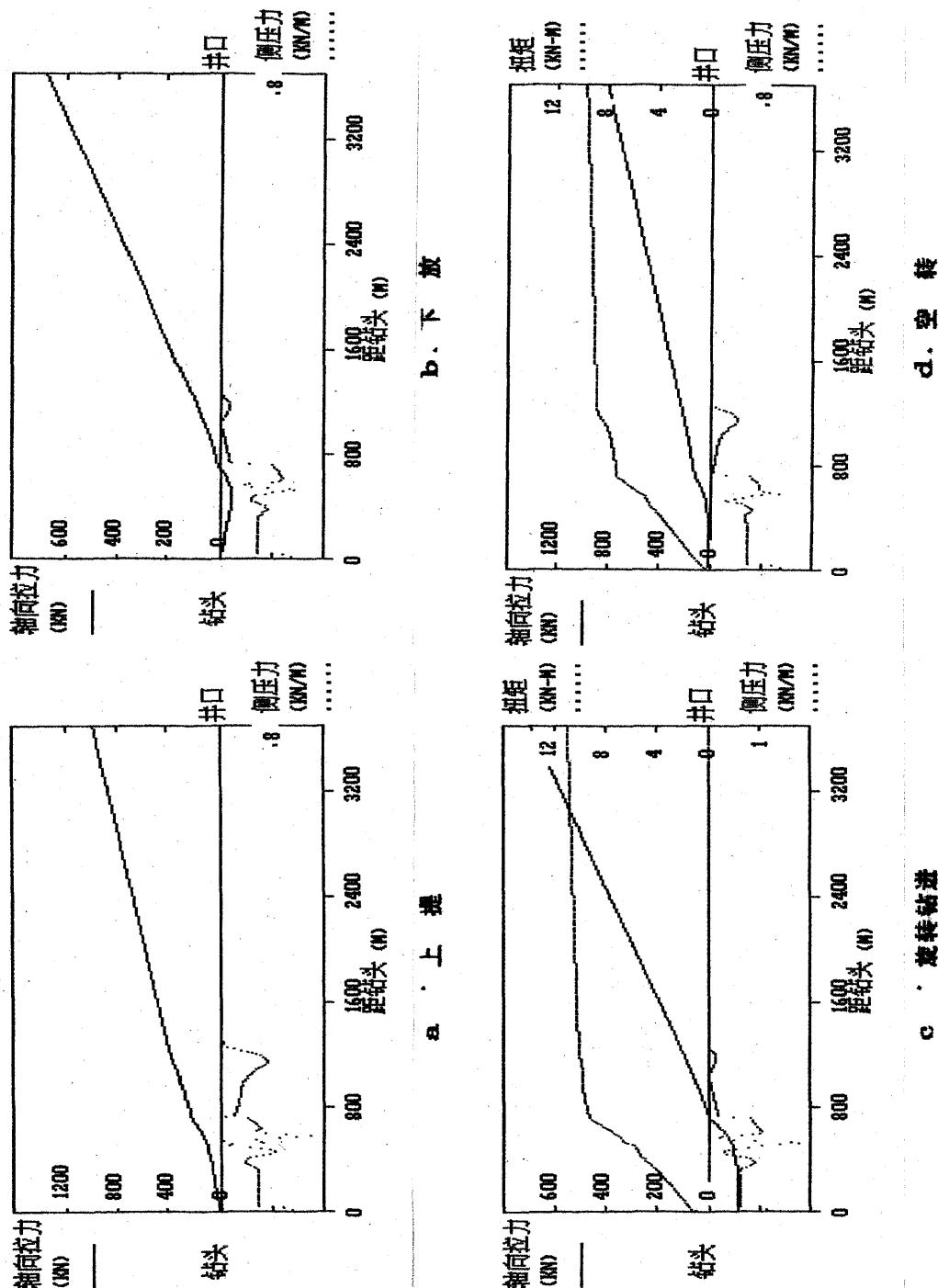


图 1-6 NMH-1 井原设计钻性受力状态

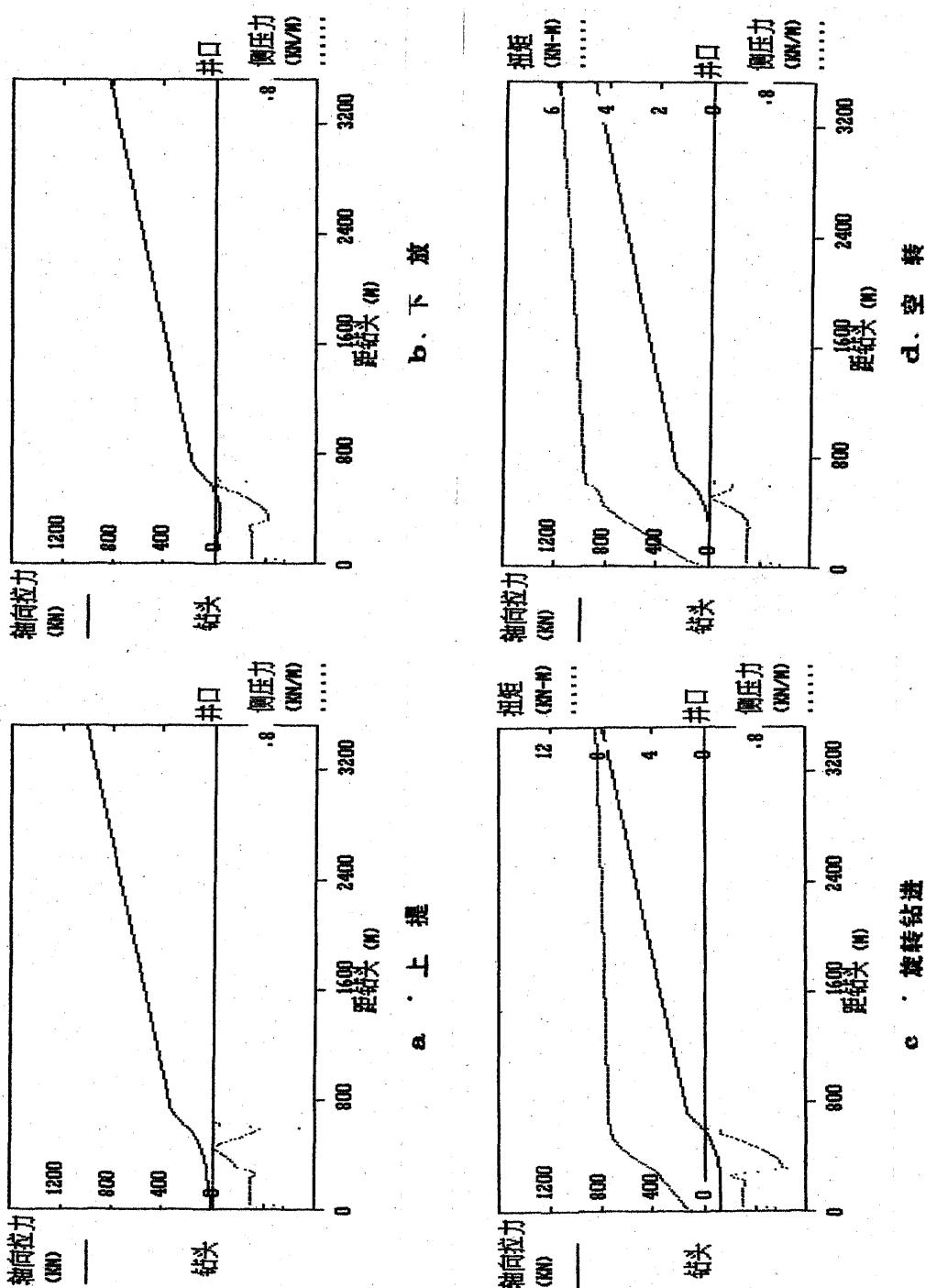


图 1-7 NWHH-1 井参考设计钻柱受力状态

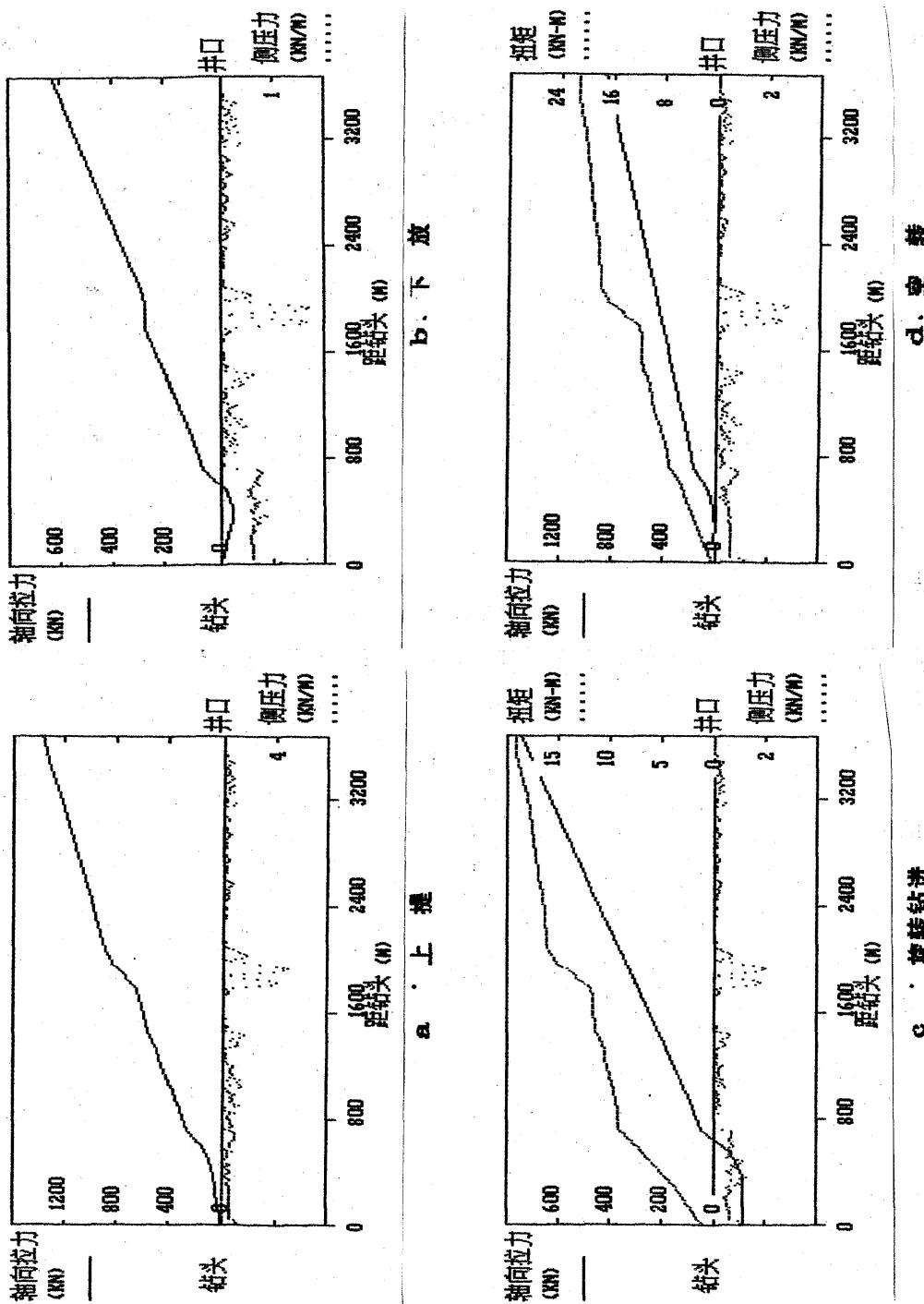


图 1-8 NMH-1 井实钻轨迹钻柱受力状态

根据上述要求, 对NMH-1井的实钻井身剖面和设计井深剖面的水平段长度与钻柱最大载荷、最小安全系数和稳定性进行了计算。

在表1-6中, 上提摩擦系数为.24, 下放摩擦系数为0.206, 剖面为实钻井眼轨迹。若将正常作业的钻柱最小安全系数取为1.5, 则水平段最长可钻1200M, 此时若需震击解卡, 钻柱的安全系数则仅有1.15。若将上提摩擦系数取为0.30、下放摩擦系数取为.25(表1-7)则水平段受钻柱稳定限制只能钻800M, 此时起钻钻柱安全系数为1.62, 震击解卡钻柱安全系数1.13。

在表1-8中, 采用原设计剖面, 平均摩擦系数和初选的钻具, 受钻柱稳定性限制, 该井水平段可钻1400M, 起钻钻柱安全系数为1.92, 震击解卡时为1.53。若将钻具的158mm钻铤由300M增至500M(表1-9)则水平段长可达2000M, 此时起钻钻柱安全系数1.57, 震击解卡时为1.32。

### 第三节 小 结

综合本部分研究, 得出如下结论:

1. 根据钻柱的实际受力情况, 考虑了钻柱构成、井眼环境和作业过程三大类因素, 建立了稳态拉力-扭矩模型, 该模式适用于一切钻井过程中钻柱受力状态的计算。
2. 在建模过程和模式中, 充分采用了微分几何理论, 取得了良好的效果, 说明微分几何在井眼轨迹设计和计算中有广泛的应用前景。
3. 根据所建的稳态钻柱拉力-扭矩模型, 编制了多功能计算机软件, 该软件可确定钻柱与井壁的摩擦系数、预测和计算钻柱的受力状态、确定动力钻进的实际钻压、优选井眼剖面、校核钻柱和预测水平井段最大可钻长度。
4. NMH-1井的摩擦系数为: (1)三开上提摩擦系数在0.204~0.3范围内, 平均值为0.258; 下放摩擦系数在0.141~0.249范围内, 平均值为0.185。(2)四开上提摩擦系数在0.182~0.282范围内, 平均值为0.24; 下放摩擦系数在0.14~0.252范围内, 平均值为0.208。
5. 本模式具有较高的精度, 即使采用平均摩擦系数, 计算的大钩负荷的误差也在10%以内, 可以再现场广泛应用。

表 1-6 NMH-1 井可钻水平段长度与钻柱负荷、稳定性的关系  
(实钻剖面)(平均摩擦系数)

井深(M)	水平段长(M)	作业过程	井口拉力( $10^5N$ )	井口扭矩( $10^4N\cdot M$ )	安全系数	失稳井段(M)
4263	900	井下动力钻进	5.3	0	4.87	
		下钻	5.7	0	4.55	
		转盘钻进	7.4	-2.4	2.28	
		起钻	15	0	1.71	
		震击器工作	21	0	1.23	
		井下动力钻进	5.1	0	5.03	
4563	1200	下钻	5.6	0	4.86	
		转盘钻进	7.8	-2.7	2.09	
		起钻	17	0	1.56	
		震击器工作	23	0	1.15	
		井下动力钻进	5.1	0	5.12	
		下钻	5.5	0	4.73	
4863	1500	转盘钻进	7.9	-3.0	1.90	2403~2443
		起钻	18	0	1.40	
		震击器工作	24	0	1.06	
		井下动力钻进	5.1	0	5.12	
		下钻	5.5	0	4.73	
		转盘钻进	7.9	-3.0	1.90	

钻具组合: 钻头+165mm钻铤27.5M+127mm厚壁钻杆(需加长度)M+158mm钻铤147M+震击器+127mm钻杆(g-105)3080M

摩擦系数: 上提0.24, 下放 0.206

表 1-7 NMH-1 井可钻水平段长度与钻柱负荷、稳定性的关系  
(实钻剖面)(最大摩擦系数)

井深(M)	水平段长(M)	作业过程	井口拉力( $10^5N$ )	井口扭矩( $10^4N\cdot M$ )	安全系数	失稳井段(M)
3763	400	井下动力钻进	5.3	0	4.84	
		下钻	5.7	0	4.54	
		转盘钻进	7.2	-2.3	2.38	
		起钻	15.0	0	1.72	
		震击器工作	22.0	0	1.18	
		井下动力钻进	5.1	0	5.08	
3963	600	下钻	5.5	0	4.72	
		转盘钻进	7.2	-2.5	2.22	
		起钻	16.0	0	1.62	
		震击器工作	23.0	0	1.13	
		井下动力钻进	4.9	0	5.33	
		下钻	5.3	0	4.89	2383~2483
4163	800	转盘钻进	7.3	-2.7	2.08	
		起钻	17.0	0	1.51	
		震击器工作	24.0	0	1.07	
		井下动力钻进	4.9	0	5.33	
		下钻	5.3	0	4.89	
		转盘钻进	7.3	-2.7	2.08	

钻具组合: 钻头+165mm钻铤27.5M+127mm厚壁钻杆(需加长度)M+158mm钻铤147M+震击器+127mm钻杆(g-105)3080M

摩擦系数: 上提0.30, 下放 0.25

表1-8 NMH-1井可钻水平段长度与钻柱负荷、稳定性关系  
(设计剖面)(第一套钻具)

井深(M)	水平段长(M)	作业过程	井口拉力( $10^5N$ )	井口扭矩 $10^4N\cdot M$	安全系数	失稳井段(M)
4596	1200	井下动力钻进	8.1	0	4.21	
			6.7	0	3.89	
			8.3	-2.1	2.29	
			13.0	0	1.99	
			16.0	0	1.58	
		转盘钻进	5.8	0	4.43	
			6.4	0	4.05	
			8.4	-2.3	2.20	
			13.0	0	1.92	
			17.0	0	1.53	
4796	1400	起钻震击器工作	5.5	0	4.68	
			6.1	0	4.24	
			8.4	-2.4	2.11	
			14.0	0	1.85	
			17.0	0	1.492	
		井下动力钻进	5.8	0	4.43	
			6.4	0	4.05	
			8.4	-2.3	2.20	
			13.0	0	1.92	
			17.0	0	1.53	
4996	1600	转盘钻进	5.5	0	4.68	2336~2496
			6.1	0	4.24	
			8.4	-2.4	2.11	
			14.0	0	1.85	
			17.0	0	1.492	
		起钻震击器工作	5.8	0	4.43	
			6.4	0	4.05	
			8.4	-2.3	2.20	
			13.0	0	1.92	
			17.0	0	1.53	

钻具组合: 钻头+165mm钻铤27.5M+127mm厚壁钻杆(需加长度)M+158mm钻铤300M+震击器+127mm钻杆(g-105) 2760M

摩擦系数: 上提0.24, 下放 0.206

表1-9 NMH-1井可钻水平段长度与钻柱负荷、稳定性关系  
(设计剖面)(第二套钻具)

井深(M)	水平段长(M)	作业过程	井口拉力( $10^5N$ )	井口扭矩 $10^4N\cdot M$	安全系数	失稳井段(M)
4896	1500	井下动力钻进	7.1	0	3.87	
			7.6	0	3.41	
			9.9	-2.4	1.97	
			15.0	0	1.71	
			18.0	0	1.41	
		转盘钻进	6.3	0	4.10	
			6.9	0	3.77	
			10.0	-2.8	1.80	
			16.0	0	1.57	
			20.0	0	1.32	
5396	2000	起钻震击器工作	5.5	0	4.67	
			6.1	0	4.22	
			10.0	-3.3	1.66	
			18.0	0	1.45	
			21.0	0	1.23	
		井下动力钻进	5.8	0	4.43	
			6.4	0	4.05	
			8.4	-2.3	2.20	
			13.0	0	1.92	
			17.0	0	1.53	
5896	2500	转盘钻进	5.5	0	4.67	3056~3196
			6.1	0	4.22	
			10.0	-3.3	1.66	
			18.0	0	1.45	
			21.0	0	1.23	
		起钻震击器工作	5.8	0	4.43	
			6.4	0	4.05	
			8.4	-2.3	2.20	
			13.0	0	1.92	
			17.0	0	1.53	

钻具组合: 钻头+165mm钻铤27.5M+127mm厚壁钻杆(需加长度)M+158mm钻铤500M+震击器+127mm钻杆(g-105)2560M

摩擦系数: 上提0.24, 下放 0.206

## 第二章 导向钻具组合的权余法力学分析

### 引言

井眼轨迹控制理论是从研究下部/导向钻具组合的受力和变形开始的。通过下部/导向钻具组合进行分析，可以求得钻头的机械作用力和转角。从五十年初Lubinski 的开创性的工作以来，这个问题的研究一直很受重视，从静力分析到动力分析，从二维到三维，该项研究不断发展和深入，已经取得了许多研究成果，并在生产中发挥了重要的技术指导作用。迄今为止，国内外学者应用于下部/ 导向钻具组合分析的数学方法概括为二大类，即微分方程法(包括经典微分方程法，纵横弯曲法，差分法，加权余量法等)和变分法(有限元法，能量法)。

在下部钻具分析方面，美国的研究成果较多也较先进。表2-1 列出了美国几个主要石油公司所采用的下部钻具组合分析方法，其中的有限元法可扩展到导向钻具组合。

表2-1 美国石油公司的下部钻具组合分析方法<sup>[48]</sup>

公司	下部钻具组合分析方法
AMOCO	有限元法，三维小变形
ANADRIL	微分方程法，三维小变形
CALLAS	微分方程法，二维小变形
DRILCO	微分方程法，二维小变形
EASTMAN	有限元法，三维小变形
JAR/DRDC	有限元法，三维小变形
SHELL	微分方程法，二维大挠度
NL	微分方程法，三维大挠度

在八十年代，下部钻具分析理论和方法在我国获得了较大发展，目前正处于发展的顶峰阶段。表2-2列出了我国各主要研究单位所采用的下部钻具组合分析方法。

所谓的微分方程法就是在对下部/ 导向钻具组合及其约束进行适当的简化后，建立其力学分析的微分方程和定解条件，然后再用解析的、半解析的或数值的方法求得解答。微分方程法的优点是运算速度快，便于推广使用。由于力学微分方程比较复杂，经典微分方程解法的应用受到了很大限制。纵横弯曲法仅适用求解下部/ 导向钻具组合的二维问题，对三维问题则不理想。有限差分法是一个较好的数值方法，已被用于求解下部/ 导向钻具组合的小变形问题和大挠度问题，并获得成功；它的缺点是：为了提高解的

表2-2 国内各主要研究单位的下部钻具组合分析方法

单 位	下部钻具组合分析方法
石油勘探开发 科学研究院	有限元法, 三维小变形 微分方程法, 二维小变形
石油大学	微分方程法, 三维大小挠度 有限元法, 三维大小挠度
西南石油学院	有限元法, 三维小变形
大庆石油学院	有限元法, 三维小变形

精度, 必须减小差分格子, 导致更大的运算矩阵, 降低运算速度。加权余量法是一个求解微分方程定解问题的强有力的数据方法, 具有简便、准确、工作量小、残差可知等优点, 已成功地用于下部/导向钻具组合的大小挠度力学分析中; 当然, 要进一步提高精度就得增加试函数项数, 也会增加一些运算量。

有限元法是一种很好的数据方法, 特别适用于求解区域不规则、约束复杂的数学和力学问题, 在下部/导向钻具组合静动态分析中被广泛采用; 该方法的缺点是: 为了提高精度, 就得减小单元尺寸, 使得本来就大的运算量急剧增加。能量法仅用在下部钻具组合的二维小变形静力分析中。使用这种方法在处理钻具与井壁接触问题时很不方便。

笔者在认识了上述各种方法的优缺点后, 确定采用微分方程法对下部/导向钻具组合进行大、小挠度力学分析, 并根据微分方程和定解条件, 采用加权余量法求解。在分析中采用下列基本假设:

- (1) 下部/导向钻具各结构单元均处于弹性状态;
- (2) 下部/导向钻具各结构单元为圆形截面、任意材料性质但分段保持为常数;
- (3) 钻头与地层间无弯矩存在;
- (4) 井壁与井眼轴线平行, 在接触点处对钻具刚性支撑;
- (5) 在切点以上钻柱躺在井壁下边;
- (6) 略去钻柱、钻井液的动力效应;
- (7) 施加于钻具上的扭矩可以沿钻柱有所变化, 但分段保持为常量。

## 第一节 下部/导向钻具组合小挠度权余法力学分析

### 一. 下部/导向钻具组合小挠度力学分析的数学模型

#### 1. 建立参考坐标系

取空间笛卡尔参考坐标系  $oxyz$ , 如图2-1所示, 其中  $z$  轴与井底切线方向一致,

指向钻铤上方;  $x$  轴垂直于  $z$  轴, 指向井眼低边;  $y$  轴用右手法则确定。 $xoz$  平面为铅垂面;  $yoz$  平面称为井斜方位平面。原点  $O$  取在钻头处。 $\alpha$  为井底的井斜角。井眼轴线用  $\vec{r} = X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k}$  表示。钻柱轴线用  $\vec{R} = U \vec{i} + V \vec{j} + W \vec{k}$  表示。

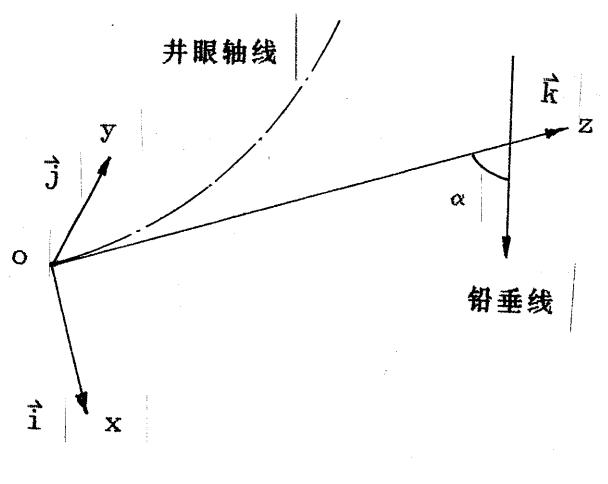


图2-1 笛卡尔参考坐标系

## 2. 微分方程

下部钻具组合可视为纵横弯曲梁柱, 有  $n-1$  个稳定器, 接触点分割成  $n$  个独立的结构单元。下部/导向钻具组合处于三维弯曲井眼里, 受自重、钻压、扭矩、井壁支撑反力及钻井液静水压力等作用, 产生空间弯曲变形。除了引言中的假设条件外, 还要假设钻柱的挠度相对于其长度为小量。

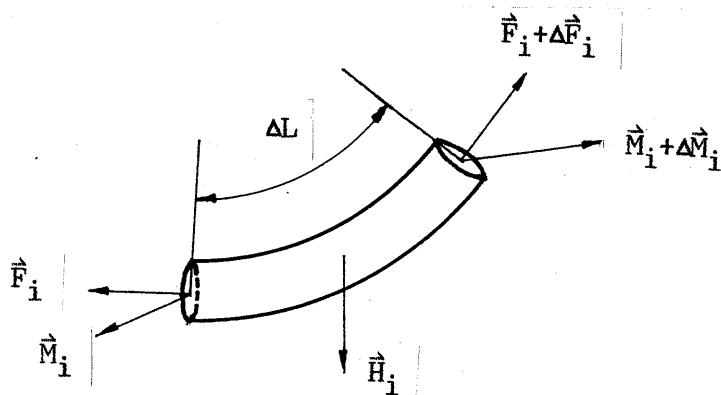


图2-2 钻柱微元受力分析

取第  $i$  段钻柱微元如图2-2所示,  $\Delta L$  表示该微元的长度,  $\vec{H}_i$  表示单位长度的外力矢量,  $\vec{F}_i$  表示内力矢量,  $\vec{M}_i$  表示内力矩矢量。根据力平衡方程:

$$\frac{d\vec{F}_i}{dl} = -H_i \quad (2.1)$$

力矩平衡方程:

$$\frac{d\vec{M}_i}{dl} = \vec{F}_i \times \vec{t}_i \quad (2.2)$$

和本构方程:

$$\vec{M}_i = E_i I_i (\vec{t}_i \times \frac{d\vec{t}_i}{dl}) + G_i J_i \frac{dv_{ci}}{dl} \vec{t}_i \quad (2.3)$$

以及假设条件, 推导出下部/导向钻具三维静力小挠度微分方程组:<sup>[48]</sup>

$$E_i I_i \frac{d^4 U_i}{dl^4} = -T_i \frac{d^3 V_i}{dl^3} + (P_i \cos \alpha_i l - WB_i) \frac{d^2 U_i}{dl^2} + P_i \cos \alpha_i \frac{dU_i}{dl} + P_i \sin \alpha_i \quad (2.4)$$

$$E_i I_i \frac{d^4 V_i}{dl^4} = T_i \frac{d^3 U_i}{dl^3} + (P_i \cos \alpha_i l - WB_i) \frac{d^2 V_i}{dl^2} + P_i \cos \alpha_i \frac{dV_i}{dl} \quad (2.5)$$

式中:  $l$  —— 沿钻柱轴线的局部坐标, 以  $i$  段钻柱的底端为起点;

$\vec{t}_i$  ——  $i$  段钻柱轴向的切向量;

$E_i$  ——  $i$  段钻柱的弹性模量;

$I_i$  ——  $i$  段钻柱的抗弯截面模量;

$G_i$  ——  $i$  段钻柱的剪切弹性模量;

$J_i$  ——  $i$  段钻柱的抗扭截面模量;

$\gamma_{ci}$  ——  $i$  段钻柱的扭转角;

$U_i$  ——  $i$  段钻柱在  $x$  方向的位移;

$V_i$  ——  $i$  段钻柱在  $y$  方向的位移;

$T_i$  ——  $i$  段钻柱所受扭矩;

$WB_i$  ——  $i$  段钻柱底部所受压力(压为正);

$P_i$  ——  $i$  段钻柱在钻井液中的线重度;

$\alpha_i$  ——  $i$  段钻柱所在井段的井斜角。

### 3. 导向钻具中弯角及装置角的数学处理

#### (1) 相邻函数定理<sup>[48]</sup>

如果在  $Z=C$  时, 两个函数  $f_1(z)$  和  $f_2(z)$  的数值以及第一次到第  $n$  ( $n$  为正整数) 次导数的全部数值都仅仅相差一个常数,  $N_0, N_1, N_2, \dots, N_n$ ,

$$\left. \begin{array}{l} f_2(c) = f_1(c) + N_0 \\ f_2'(c) = f_1'(c) + N_1 \\ f_2''(c) = f_1''(c) + N_2 \\ \vdots \\ f_2^{(n)}(c) = f_1^{(n)}(c) + N_n \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

而二函数的所有更高次的导数值都对应地相等，那么函数  $f_2(z)$  与  $f_1(z)$  之间存在如下关系：

$$f_2(z) = f_1(z) + N_0 + \sum_{i=1}^n N_i \frac{(z-c)^i}{i!} \quad (2.7)$$

### (2) 相邻函数定理在纵横弯曲连续梁中的应用

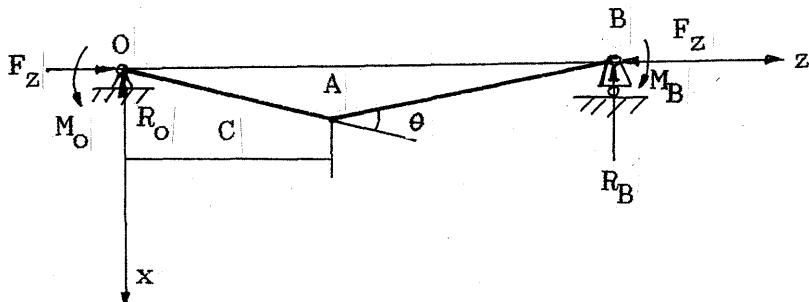


图2-3 带有弯角的纵横弯曲梁

线重度为  $P$ ，抗弯刚度为  $EI$ ，在  $A$  点具有  $\theta$  弯角的梁  $OAB$ ，简支在  $O$ 、 $B$  二支点上，在端部受压力  $F_Z$  和弯矩  $M_O$ 、 $M_B$  的作用， $OA$  段位移函数为  $f_1(z)$ ， $AB$  段位移函数函数为  $f_2(z)$ ，则在  $z=c$  处，

$$f_2(c) = f_1(c)$$

$$f_2'(c) = f_1'(c) - \sin \theta$$

通过微分方程

$$f_1'''(z) = \frac{1}{EI} [M_0 - R_0 Z + \frac{1}{2} P Z^2 - F_Z f_1(z)]$$

$$f_2'''(z) = \frac{1}{EI} [M_0 - R_0 Z + \frac{1}{2} P Z^2 - F_Z f_2(z)]$$

可以求得：

$$f_2'''(c) = f_1'''(c)$$

$$f_2'''(c) = f_1'''(c) + \sin \theta \frac{F_Z}{EI}$$

$$f_2^{(4)}(c) = f_1^{(4)}(c)$$

$$f_2^{(5)}(c) = f_1^{(5)}(c) - \sin \theta \frac{F_z^2}{E^2 I^2}$$

⋮

利用相邻函数定理得：

$$\begin{aligned} f_2(z) &= f_1(z) - \sin \theta [(z-c) - \frac{F_z}{EI}(z-c)^3 + \frac{F_z^2}{E^2 I^2}(z-c)^5 \dots] \\ &= f(z) - \sin \theta \sin[k(z-c)]/k \end{aligned} \quad (2.8)$$

式中： $k = (F_z/EI)^{1/2}$

### (3) 导向钻具上弯角及装置角的数学处理

假设位于第  $i-1$  个稳定器与第  $i$  个稳定器间的第  $i$  段钻柱上有  $m-1$  (一般  $m=1, 2$  或  $3$ ) 个弯角将该段钻柱分为  $m$  个直杆部分，弯角及装置角分别为  $\theta_{i1}, \omega_{i1}, \theta_{i2}, \omega_{i2}$ ，各部分的长度分别为  $L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}$  (若仅有一个弯角，则  $L_{i2} = L_{i3} = 0$ )。位移函数分别为  $U_{i1}, V_{i1}, U_{i2}, V_{i2}, U_{i3}, V_{i3}$ ，即：

$$U_i = \begin{cases} U_{i1} & 0 \leq l \leq L_{i1} \\ U_{i2} & L_{i1} \leq l \leq L_{i1} + L_{i2} \\ U_{i3} & L_{i1} + L_{i2} \leq l \leq L_i \end{cases} \quad (2.9)$$

$$V_i = \begin{cases} V_{i1} & 0 \leq l \leq L_{i1} \\ V_{i2} & L_{i1} \leq l \leq L_{i1} + L_{i2} \\ V_{i3} & L_{i1} + L_{i2} \leq l \leq L_i \end{cases} \quad (2.10)$$

其中， $L_i = L_{i1} + L_{i2} + L_{i3}$ ，为该段钻柱长度。

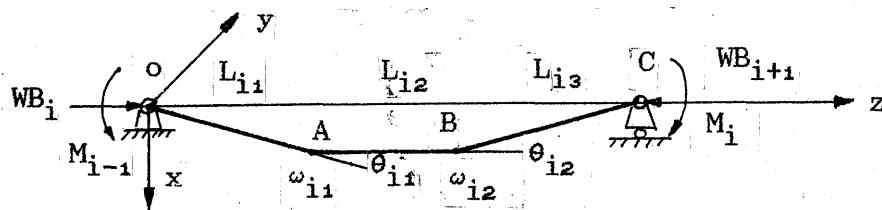


图2-4 导向钻具的弯角及装置角

若已知 OA 部分的位移函数  $U_{i1}, V_{i1}$ , 根据(2.8)式可将 AB 段位移函数用如下近似式表示:

$$U_{i2} = U_{i1} - \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i \quad (2.11)$$

$$V_{i2} = V_{i1} + \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i \quad (2.12)$$

$$L_{i1} \leq l \leq L_{i1} + L_{i2}$$

BC 段位移函数用如下近似式表示:

$$\begin{aligned} U_{i3} &= U_{i1} - \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i \\ &\quad - \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \sin[k_i(l-L_{i1}-L_{i2})]/k_i \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} V_{i3} &= V_{i1} + \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i \\ &\quad + \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \sin[k_i(l-L_{i1}-L_{i2})]/k_i \end{aligned} \quad (2.14)$$

式中:  $k_i = [(WB_i + WB_{i+1})/2E_i I_i]^{1/2}$

#### 4. 边界条件及连续条件

##### (1) 钻头处

根据笛卡尔参考坐标系的取法, 钻头位移为零,

$$U_1(o) = 0, \quad V_1(o) = 0 \quad (2.15)$$

此外, 钻头与地层间无弯矩作用, 为此

$$[U_1''(o)]^2 + [V_1''(o)]^2 = 0 \quad (2.16)$$

##### (2) 稳定器处

在各稳定器或接触点处, 钻柱位于井眼中心或在某一方向上偏离井眼中心一定距离, 稳定器两侧钻柱的位移及其一次导数连续、弯矩连续。

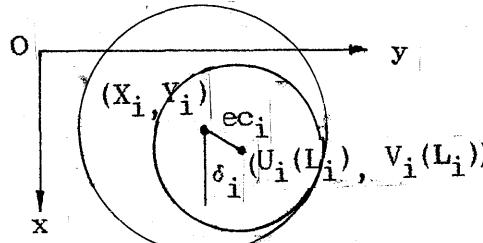


图 2-5 稳定器偏离井眼中心

$$U_i(L_i) = U_{i+1}(0) = X_i + e c_i \cos \delta_i \quad (2.17)$$

$$V_i(L_i) = V_{i+1}(0) = Y_i + e c_i \sin \delta_i \quad (2.18)$$

$$U'_i(L_i) = U'_{i+1}(0) \quad (2.19)$$

$$V'_i(L_i) = V'_{i+1}(0) \quad (2.20)$$

$$E_i I_i U''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} U''_{i+1}(0) \quad (2.21)$$

$$E_i I_i V''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} V''_{i+1}(0) \quad (2.22)$$

式中:  $e c_i$  —— 偏心距  
 $\delta_i$  —— 偏斜角

### (3) 切点处

钻柱在切点处的状态是很难精确计算的, 但一般认为在切点处钻柱躺在井壁下侧, 斜率与曲率与井眼轴线基本一致, 为此,

$$U_n(L_n) = X_n + (D_w - D_{O_n})/2 \quad (2.23)$$

$$V_n(L_n) = Y_n \quad (2.24)$$

$$U'_n(L_n) \doteq X'_n \quad (2.25)$$

$$V'_n(L_n) \doteq Y'_n \quad (2.26)$$

$$U''_n(L_n) \doteq X''_n \quad (2.27)$$

$$V''_n(L_n) \doteq Y''_n \quad (2.28)$$

式中:  $D_w$  —— 井眼直径

$D_{O_n}$  —— 切点处钻柱外径

(4) 钻柱变形受到井壁的限制, 对任意一点均必须满足

$$[(U_i - X)^2 + (V_i - Y)^2]^{1/2} \leq (D_w - D_{O_i})/2 \quad (2.29)$$

## 二. 加权余量法

### 1. 加权余量法的基本概念

大量的应用科学和工程问题往往可以归结为根据一定的边界条件、初始条件等来求解微分方程或微分方程组。加权余量法是一种可以直接求出问题的近似解的数学方法，在求解非线性问题时具有独特的优点。

如果某一问题的控制微分方程式及边界条件分别为：

$$F(u) - f = 0 \quad (\text{在 } V \text{ 域内}) \quad (a)$$

$$G(u) - g = 0 \quad (\text{在 } S \text{ 域内}) \quad (b)$$

式中：  $u$  —— 待求函数；

$f, g$  —— 不含  $u$  的项；

$F, G$  —— 微分算子。

假设试函数为

$$\hat{u} = \sum_{j=0}^n C_j N_j \quad (c)$$

式中：  $C_j$  —— 待定系数

$N_j$  —— 试函数项。

将 (c) 代入 (a) 和 (b) 式后，一般不会满足，于是分别出现了内部残值  $R_I$ 、  
边界残值  $R_B$ ：

$$R_I = \hat{u} - f \neq 0 \quad (d)$$

$$R_B = \hat{u} - g \neq 0 \quad (e)$$

为了减小残值，使  $u$  最大程度地接近精确解，可令试函数在区域内部和边界的某些点上残值为零，即

$$R_I = \hat{u} - f = 0 \quad (\text{在 } V \text{ 域内}) \quad (f)$$

$$R_B = \hat{u} - g = 0 \quad (\text{在 } S \text{ 边界上}) \quad (g)$$

或令区域内部的平均残值为零，边界上的平均残值也为零，即

$$\int_V R_I W_I dV = 0 \quad (\text{在 } V \text{ 域内}) \quad (h)$$

$$\int_S R_B W_B dS = 0 \quad (\text{在 } S \text{ 边界上}) \quad (i)$$

据此, 即可解得待定系数  $C_j$ 。将  $C_j$  代入 (c) 即为方程 (a) 和 (b) 的近似解。前一种消除残值的方法称为配点法, 而后一种消除残值的方法称为子域法。

## 2. 试函数的选择

在加权余量法中, 试函数的选择相当重要。根据近年来国内外加权余量法工作的实践, 曾应用过下列八种试函数:

- (1) 多项式 —— 以幂级数形式表示;
- (2) 三角级数;
- (3) 样条函数;
- (4) 梁振动函数;
- (5) 柱稳定函数;
- (6) 正交多项式;
- (7) 贝塞耳函数;
- (8) 克雷诺夫函数。

选择的试函数必须是连续的和完备的, 并且各试函数项之间是线性无关的, 最后具备计算的稳定性和解的较快收敛速度。这便是选择试函数的原则。

根据导向钻具受力分析模型, 本文选择多项式试函数。

## 3. 算例

受均步载荷  $q$  的弹性梁, 两端简支, 如图 2-6 所示  
梁变形微分方程和边界条件分别为:

$$x^{(4)} = \frac{q}{EI} \quad (j)$$

$$\begin{cases} x(0) = x(L) = 0 \\ x''(0) = x''(L) = 0 \end{cases} \quad (k)$$

取四次多项式作为试函数, 即

$$\hat{x} = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + c_3 z^3 + c_4 z^4 \quad (l)$$

将 (l) 式代入 (j) 和 (k) 式中, 并在梁内选一配点用配点法消除残值, 求得待定系数:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_0 = 0 \\ c_1 = -\frac{qL^3}{24EI} \\ c_2 = 0 \\ c_3 = -\frac{qL}{12EI} \\ c_4 = -\frac{q}{24EI} \end{array} \right. \quad (m)$$

将 (m) 代回 (1) 式中所确定的挠度函数与精确解完全相同。

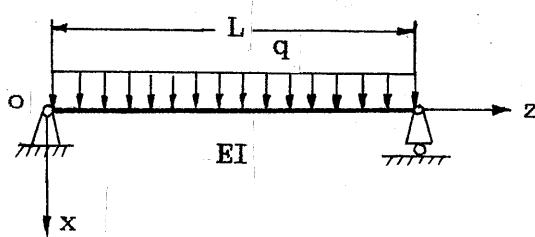


图 2-6 加权余量算例

### 三. 下部/导向钻具小挠度加权余量法分析

#### 1. 下部/导向钻具小挠度力学分析的加权余量解

将 (2.4) 和 (2.5) 式移项，并令

$$\left\{ \begin{array}{l} t_i = \frac{T_i}{E_i I_i}, \quad f_i = \frac{P_i \cos \alpha_i}{E_i I_i} \\ B_i = \frac{W B_i}{E_i I_i}, \quad e_i = -\frac{P_i \sin \alpha_i}{E_i I_i} \end{array} \right. \quad (2.30)$$

得：

$$-\frac{d^4 U_i}{dl^4} - t_i \frac{d^3 V_i}{dl^3} + (f_i l - B_i) \frac{d^2 U_i}{dl^2} + f_i \frac{dU_i}{dl} = e_i \quad (2.31)$$

$$-\frac{d^4 V_i}{dl^4} + t_i \frac{d^3 U_i}{dl^3} + (f_i l - B_i) \frac{d^2 V_i}{dl^2} + f_i \frac{dV_i}{dl} = 0 \quad (2.32)$$

令分段位移试函数

$$U_i = \begin{cases} \sum_{r=0}^{xsh} a_{ir} l^r & (0 \leq l \leq L_{i1}) \\ \sum_{r=0}^{xsh} a_{ir} l^r - \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i & (L_{i1} \leq l \leq L_{i1} + L_{i2}) \\ \sum_{r=0}^{xsh} a_{ir} l^r - \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i \\ - \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \sin[k_i(l-L_{i1}-L_{i2})]/k_i & (L_{i1} + L_{i2} \leq l \leq L_i) \end{cases} \quad (2.33)$$

$$V_i = \begin{cases} \sum_{r=0}^{xsh} b_{ir} l^r & (0 \leq l \leq L_{i1}) \\ \sum_{r=0}^{xsh} b_{ir} l^r + \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i & (L_{i1} \leq l \leq L_{i1} + L_{i2}) \\ \sum_{r=0}^{xsh} b_{ir} l^r + \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(l-L_{i1})]/k_i \\ + \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \sin[k_i(l-L_{i1}-L_{i2})]/k_i & (L_{i1} + L_{i2} \leq l \leq L_i) \end{cases} \quad (2.34)$$

其中 $xsh \geq 4$ , 为试函数项数。

该试函数应满足该段钻柱右端位移、一阶导数和二阶导数的边界条件:

$$U_i(L_i) = \sum_{r=0}^{xsh} a_{ir} L_i^r - \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(L_i - L_{i1})]/k_i \quad (2.35) \\ - \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \sin[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})]/k_i$$

$$V_i(L_i) = \sum_{r=0}^{xsh} b_{ir} L_i^r + \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(L_i - L_{i1})]/k_i \quad (2.36) \\ + \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \sin[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})]/k_i$$

$$U_i'(L_i) = \sum_{r=0}^{xsh} r a_{ir} L_i^{r-1} - \sin \theta_{i1} \cos \omega_{i1} \cos [k_i(L_i - L_{i1})] - \sin \theta_{i2} \cos \omega_{i2} \cos [k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \quad (2.37)$$

$$V_i'(L_i) = \sum_{r=0}^{xsh} r b_{ir} L_i^{r-1} + \sin \theta_{i1} \sin \omega_{i1} \cos [k_i(L_i - L_{i1})] + \sin \theta_{i2} \sin \omega_{i2} \cos [k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \quad (2.38)$$

$$U_i''(L_i) = \sum_{r=0}^{xsh} r(r-1) a_{ir} L_i^{r-2} + k_i \sin \theta_{i1} \cos \omega_{i1} \sin [k_i(L_i - L_{i1})] + k_i \sin \theta_{i2} \cos \omega_{i2} \sin [k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \quad (2.39)$$

$$V_i''(L_i) = \sum_{r=0}^{xsh} r(r-1) b_{ir} L_i^{r-2} - k_i \sin \theta_{i1} \sin \omega_{i1} \sin [k_i(L_i - L_{i1})] - k_i \sin \theta_{i2} \sin \omega_{i2} \sin [k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \quad (2.40)$$

在该段钻柱左端 ( $i=0$ )，试函数值应与给定的位移相等，有：

$$a_{i0} = U_i(0) \quad (2.41)$$

$$b_{i0} = V_i(0) \quad (2.42)$$

除了  $a_{i0}$ ,  $b_{i0}$  外，在试函数 (2.33) 和 (2.34) 中还有  $a_{i1}, \dots, a_{ixsh}$ ,  $b_{i1}, \dots, b_{ixsh}$  共  $2 \times xsh$  个未知数，右端边界条件共给出 (2.35) 至 (2.40) 总计 6 个独立方程，若确定全部系数还需用加权余量配点法在微分方程 (2.31) 和 (2.32) 及试函数 (2.33) 和 (2.34) 的基础上建立  $2 \times xsh - 6$  个独立方程。为此将该段钻柱均匀分为  $xsh - 2$  段，在  $L_{ij} = j \times L_i / (xsh - 2)$  ( $j = 1, 2, \dots, xsh - 3$ ) 处均匀设置  $xsh - 3$  个配点，使得试函数在这些配点上满足微分方程：

$$-\sum_{r=1}^{xsh} r(r-1)(r-2)(r-3) a_{ir} l_{ij}^{r-4} - t_i \sum_{r=1}^{xsh} r(r-1)(r-2) l_{ij}^{r-3} b_{ir} + (f_i l_{ij} - B_i) \sum_{r=1}^{xsh} r(r-1) a_{ir} l_{ij}^{r-2} + f_i \sum_{r=1}^{xsh} r a_{ir} l_{ij}^{r-1} = e_i + WJ1_{ij} \quad (2.43)$$

$$-\sum_{r=1}^{xsh} r(r-1)(r-2)(r-3) b_{ir} l_{ij}^{r-4} + t_i \sum_{r=1}^{xsh} r(r-1)(r-2) l_{ij}^{r-3} a_{ir} + (f_i l_{ij} - B_i) \sum_{r=1}^{xsh} r(r-1) b_{ir} l_{ij}^{r-2} + f_i \sum_{r=1}^{xsh} r b_{ir} l_{ij}^{r-1} = WJ2_{ij} \quad (2.44)$$

其中：当  $0 \leq l_{ij} \leq L_{i1}$  时

$$WJ1_{ij} = WJ2_{ij} = 0 \quad (2.45)$$

当  $L_{i1} \leq l_{ij} \leq L_{i1} + L_{i2}$  时

$$\begin{aligned} WJ1_{ij} = & -k_i \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(l_{ij}-L_{i1})] (k_i^2 + f_i l_{ij} - B_i) \\ & + \sin\theta_{i1} \cos[(k_i(l_{ij}-L_{i1}))] (f_i \cos\omega_{i1} - t_i k_i^2 \sin\omega_{i1}) \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} WJ2_{ij} = & k_i \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(l_{ij}-L_{i1})] (k_i^2 + f_i l_{ij} - B_i) \\ & - \sin\theta_{i1} \cos[(k_i(l_{ij}-L_{i1}))] (t_i k_i^2 \cos\omega_{i1} + f_i \sin\omega_{i1}) \end{aligned} \quad (2.47)$$

当  $L_{i1} + L_{i2} \leq l_{ij} \leq L_i$  时

$$\begin{aligned} WJ1_{ij} = & -k_i (k_i^2 + f_i l_{ij} - B_i) \{ \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(l_{ij}-L_{i1})] \\ & + \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \sin[k_i(l_{ij}-L_{i1}-L_{i2})] \} \\ & + \sin\theta_{i1} \cos[(k_i(l_{ij}-L_{i1}))] (f_i \cos\omega_{i1} - t_i k_i^2 \sin\omega_{i1}) \\ & + \sin\theta_{i2} \cos[(k_i(l_{ij}-L_{i1}-L_{i2}))] (f_i \cos\omega_{i2} - t_i k_i^2 \sin\omega_{i2}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} WJ2_{ij} = & k_i (k_i^2 + f_i l_{ij} - B_i) \{ \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(l_{ij}-L_{i1})] \\ & + \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \sin[k_i(l_{ij}-L_{i1}-L_{i2})] \} \\ & - \sin\theta_{i1} \cos[(k_i(l_{ij}-L_{i1}))] (f_i \sin\omega_{i1} + t_i k_i^2 \cos\omega_{i1}) \\ & - \sin\theta_{i2} \cos[(k_i(l_{ij}-L_{i1}-L_{i2}))] (f_i \sin\omega_{i2} + t_i k_i^2 \cos\omega_{i2}) \end{aligned} \quad (2.49)$$

( $j = 1, 2, \dots, xsh-3$ )

由(2.35)至(2.40)和(2.43、2.44)式组成一个有  $2 \times xsh$  个独立方程组成的线性方

程组, 可以求解该段钻柱上所有的待定系数。

$$\begin{aligned} \text{设 } DX &= [dx_1, dx_2, \dots, dx_{xsh}]^T \\ &= [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1xsh}, b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1xsh}]^T \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_{xsh}]^T \quad (2.51)$$

则可将方程组用矩阵表达

$$M \cdot DX = C \quad (2.52)$$

从而解得

$$DX = M^{-1} \cdot C \quad (2.53)$$

其中:  $M$  和  $M^{-1}$  均为  $(2 \times xsh) \times (2 \times xsh)$  阶方阵,

$$M_{2j-1, r} = -r(r-1)(r-2)(r-3)l_{ij}^{r-4} + (f_i l_{ij} - B_i)r(r-1)l_{ij}^{r-2} + f_i r l_{ij}^{r-1}$$

$$M_{2j-1, r+xsh} = -t_i r(r-1)(r-2)l_{ij}^{r-3}$$

$$M_{2j, r} = -M_{2j-1, r+xsh}$$

$$M_{2j, r+xsh} = M_{2j-1, r}$$

$$M_{2 \times (xsh-3)+1, r} = L_i^r$$

$$M_{2 \times (xsh-3)+2, r+xsh} = L_i^r$$

$$M_{2 \times (xsh-3)+3, r} = rL_i^{r-1}$$

$$M_{2 \times (xsh-3)+4, r+xsh} = rL_i^{r-1}$$

$$M_{2 \times (xsh-3)+5, r} = r(r-1)L_i^{r-2}$$

$$M_{2 \times (xsh-3)+6, r+xsh} = r(r-1)L_i^{r-2}$$

其余项为零

$$(r=1, 2, 3, \dots, xsh)$$

$$(j=1, 2, 3, \dots, xsh-3)$$

$$C_{2j-1} = e_i + w_j l_{ij}$$

$$C_{2,j} = WJ2_{1,j}$$

(  $j=1, 2, 3, \dots, xsh-3$  )

$$\begin{aligned} C_{2\times(xsh-3)+1} &= U_i'(L_i) - U_i(0) + \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(L_i - L_{i1})]/k_i \\ &\quad + \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \sin[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})]/k_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{2\times(xsh-3)+2} &= V_i'(L_i) - V_i(0) - \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(L_i - L_{i1})]/k_i \\ &\quad - \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \sin[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})]/k_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{2\times(xsh-3)+3} &= U_i''(L_i) + \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \cos[k_i(L_i - L_{i1})] \\ &\quad + \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \cos[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{2\times(xsh-3)+4} &= V_i''(L_i) - \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \cos[k_i(L_i - L_{i1})] \\ &\quad - \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \cos[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{2\times(xsh-3)+5} &= U_i'''(L_i) - k_i \sin\theta_{i1} \cos\omega_{i1} \sin[k_i(L_i - L_{i1})] \\ &\quad - k_i \sin\theta_{i2} \cos\omega_{i2} \sin[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{2\times(xsh-3)+6} &= V_i'''(L_i) + k_i \sin\theta_{i1} \sin\omega_{i1} \sin[k_i(L_i - L_{i1})] \\ &\quad + k_i \sin\theta_{i2} \sin\omega_{i2} \sin[k_i(L_i - L_{i1} - L_{i2})] \end{aligned}$$

至此, 第 $i$ 段钻柱的位移函数已完全确定。

要研究导向钻具组合的力学特性, 必须将整个导向钻具组合作为一个整体。导向钻具的切点长度是一个未知量, 它必须使得钻头与地层间无弯矩的条件得以满足, 为此, 须对切点长度进行数值迭代计算, 其目标函数为

$$\min[U_1''(0)^2 + V_1''(0)^2] \longrightarrow 0 \quad (2.54)$$

实际上, 钻柱在切点处的状态是比较复杂的, 其曲率、斜率与井眼轴线的也可能不完全一致, 还有微分方程及其解的近似性, 用从上往下按边界条件和连续条件逐步计算的方法, 使(2.54)式满足会遇到一些困难, 为此将上述问题转化为两重最优化问题。

第一重优化是假设一切点长度, 计算导向钻具最佳解在边界处和稳定器处的误差值。第二重优化是根据误差最小的原则确定切点长度。

在第一重优化中, 假设各段钻柱位移在右端的一、二阶导数为未知量, 该未知量与给定的数值之差为误差函数项, 即令:

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dots, x_{4n})^T \quad (2.55)$$

$$= (U_1'(L_1), V_1'(L_1), U_1''(L_1), V_1''(L_1), U_2'(L_2), \dots, U_n''(L_n), V_n''(L_n))^T$$

$$\vec{E} = (E_1, E_2, \dots, E_{4n+2})^T \quad (2.56)$$

其中:

$$E_1 = U''_1(0)$$

$$E_2 = V''_1(0)$$

$$E_{4i-1} = CK_i [U'_{i+1}(0) - U'_i(L_i)]$$

$$E_{4i} = CK_i [V'_{i+1}(0) - V'_i(L_i)]$$

$$E_{4i+1} = CK_i [U''_{i+1}(0) - U''_i(L_i) E_i I_i / E_{i+1} I_{i+1}]$$

$$E_{4i+2} = CK_i [V''_{i+1}(0) - V''_i(L_i) E_i I_i / E_{i+1} I_{i+1}]$$

$$CK_i = \begin{cases} 1 & (i \neq n) \\ (0, 1) & (i = n) \end{cases}$$

$U'_{i+1}(0), V'_{i+1}(0), U''_{i+1}(0), V''_{i+1}(0)$ 由(2.53)式计算 ( $i=1, 2, \dots, n$ ).

该切点长度下的总误差函数为:

$$EO = \min_{\vec{x}} (\vec{E}^T \cdot \vec{E}) \quad (2.57)$$

该极小值就反映了在该切点长度下, 导向钻具组合的边界总误差。这一过程中采用了非线性最小二乘法。

在第二重优化中, 初步选定几个切点长度, 针对每个切点长度用第一种优化确定边界总误差, 再用三点二次插值确定实际合理的切点长度。

整个优化过程可用下式表示:

$$\min_{\vec{l}_n} [\min_{\vec{x}} (\vec{E}^T \cdot \vec{E})] \quad (2.58)$$

使(2.58)式成立的各段试函数, 就是整个导向钻具组合的位移函数。

若位移函数是真实的, 则必须满足

$$[(U_i - X)^2 + (V - Y)^2]^{1/2} \leq (Dw - DO_i)/2 \quad (2.59)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

否则在第*i*段中点处虚设一稳定器，对钻柱及稳定器重新编号，并令：

$$ec_i = (D_w - D_{O_i})/2 \quad (2.60)$$

$$\delta_i = \begin{cases} \arctg \frac{V_i(L_i/2)}{U_i(L_i/2)} & (U_i > 0) \\ \pi + \arctg \frac{V_i(L_i/2)}{U_i(L_i/2)} & (U_i < 0) \end{cases} \quad (2.61)$$

重新计算，直至(2.59)成立为止。

### (1) 增井斜力、增方位力的计算

钻头的增斜力：

$$F_b = +6E_1 I_1 a_{18} \quad (2.62)$$

增方位力：

$$F_w = -6E_1 I_1 b_{18} \quad (2.63)$$

### (2) 钻头的偏转角

钻头的偏转角发生在某一斜平面内，为了表达和运用方便，将其投影到井斜平面和井斜方位平面内。

钻头的偏转角在井斜平面内的投影：

$$\Theta_x = a_{11} \quad (2.64)$$

钻头的偏转角在井斜方位平面内的投影：

$$\Theta_y = b_{11} \quad (2.65)$$

### (3) 井壁对各稳定器的支撑力

井壁对第*i*个各稳定器的支撑力在x方向的分量：

$$R_{X_i} = E_i I_i U_i''(L_i) - E_{i+1} I_{i+1} U''_{i+1}(0) \quad (2.66)$$

井壁对第*i*个各稳定器的支撑力在y方向的分量：

$$R_{Y_i} = E_i I_i V_i''(L_i) - E_{i+1} I_{i+1} V''_{i+1}(0) \quad (2.67)$$

## 2. 导向钻具组合三维小挠度力学分析程序

利用上述加权余量法分析结果，可以编制出通用的导向钻具组合三维小挠度静态力学分析程序(程序框图如图2-7所示)，借助于微机便能计算各种导向钻具组合任意一点的挠度、转角及内力，包括钻头的受力和转角，并能研究各参数变化时，钻头受力和转角的变化规律或趋势。

运行导向钻具组合三维小挠度静力力学分析程序时，要求输入的数据可分为导向钻

具结构参数、井眼几何参数和操作参数三大类。其中导向钻具结构参数包括各段钻铤的长度、外径、内径、线重度、弹性模量、弯角个数及弯角的大小和装置角；井眼几何参数分为实际井眼参数和弧形井眼参数两种，实际井眼参数包括井深、井斜角、方位角和井眼扩大系数，弧形井眼参数包括井斜角、井眼曲率和曲率中心的方向及井眼扩大系数；操作参数包括钻压、钻头直径、钻井液密度。

当选择状态计算时，仅分析该钻具组合在该井眼和该操作参数下的受力状态。当选择参数研究时，计算机按钻具结构参数、井眼几何参数和操作参数三大类共提供二十多项参数请用户选择，运行结束时在打印机上打印出所选择的参数值与钻头的增斜力、增方位力和钻头偏转角之间的关系，在屏幕上显示出钻头的增斜力、增方位力随所选择的参数的变化曲线，最后拷贝到打印纸上。该程序在求出钻具各点的挠度值后，自动检验钻铤是否与井壁接触，一旦接触，就将该点作为虚拟稳定器把该跨段分成两段，并对偏心适当处理，对钻具跨段和参数重新编号重新计算，直到所有的约束条件得到满足后再继续运行。

### 3. 参数研究

影响下部/导向钻具组合力学特性的因素很多，主要包括下部/导向钻具结构参数（各段钻铤的长度、刚度、线重度、弯角、装置角、稳定器个数、安放位置、稳定器的偏心度）、井眼几何参数（井眼曲率半径、曲率中心方向、井斜角）和操作参数（钻压、钻井液密度）。应用导向钻具力学分析程序，可以算出上述各种因素对导向钻具力学特性的影响效果。计算所用的钻具如图 2-8 所示，包括了典型的降斜钻具组合、增斜钻具组合、稳斜钻具组合、单弯导向钻具组合、和反向双弯钻具组合。计算结果以曲线的形式表示，见图 2-9 至图 2-22。下面就分析上述主要因素对井斜力和方位力的影响。

#### (1) 钻压的影响

钻压是影响钻头与地层作用力的重要参数之一，而且是一个可以人为控制的钻井参数，研究它的影响规律，对于井眼轨迹的预测和控制是十分必要的。下部/导向钻具三维小挠度力学分析（图 2-9）表明，多数情况下，增井斜力随钻压增加微增。钻压对增方位力有些影响，但力的数值很小。

#### (2) 井斜角的影响

钻具的横向分布载荷是由于重力和井斜而产生的。当下部/导向钻具组合选定后，横向分布载荷大小取决于井斜角的大小，同时轴向载荷密度也随井斜角而变化。因此，钻头与地层的作用力必然与井斜角有密切的关系。图 2-10 表明，降斜钻具的降斜力随井斜角的增大而增大；增斜钻具Ⅳ、单弯导向钻具Ⅱ、反向双弯钻具Ⅰ的增井斜力随井斜角的增大而增大，其中以钻具Ⅳ最为明显。井斜角对稳斜钻具的增斜特性无明显作用。井斜角对增方位力的影响很小，规律不明显。

#### (3) 井眼曲率的影响

各种钻具组合均具有抗弯刚度，当它们受到井眼弯曲作用时，必然出现自身的反抗

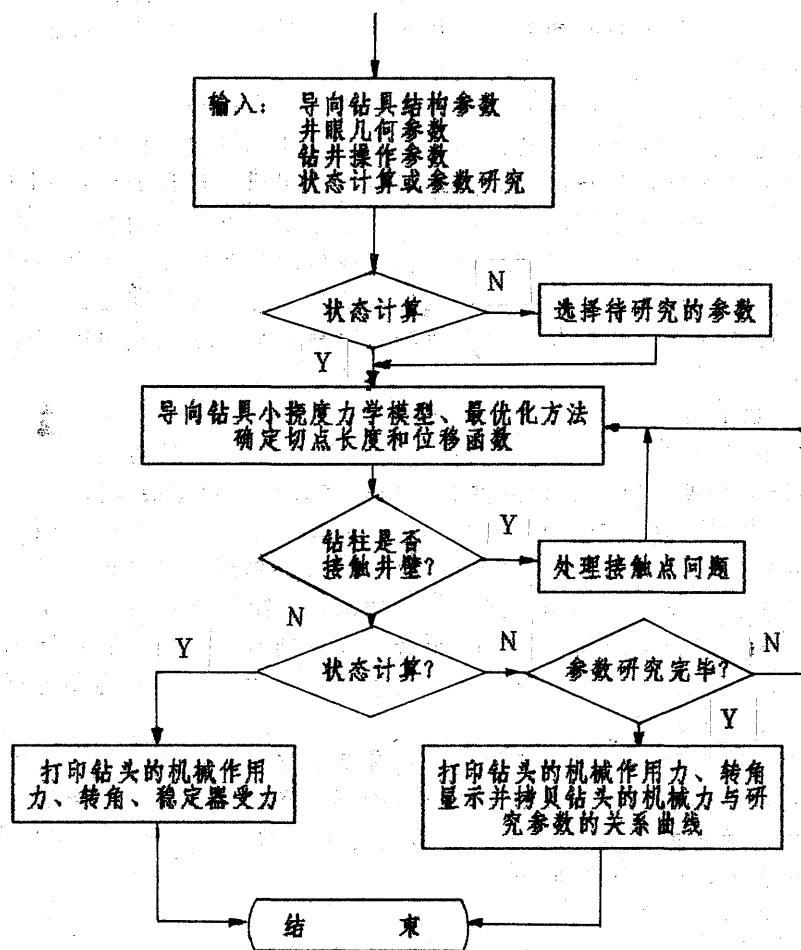
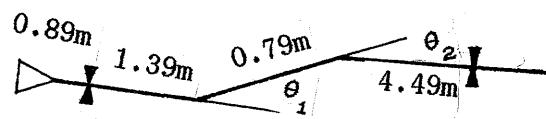
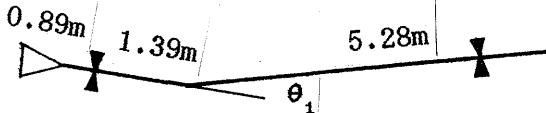


图2-7 导向钻具三维小挠度力学分析程序框图

I 反向双弯导向钻具



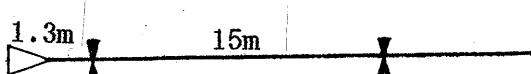
II 单弯导向钻具



III 降斜钻具



IV 增斜钻具



V 稳斜钻具



图 2-8 下部 / 导向钻具组合实例

I、II 钻具组合, 钻头直径 215.9mm, 钻铤外径 165mm, 抗弯截面模量 2310cm<sup>4</sup>, 线重 1000N/m, 单弯角 1.5°, 双弯角 1°、0.5°; III、IV、V 钻具组合, 钻头直径 215.9mm, 钻铤外径 158.75mm, 内径 57.15mm, 线重 1325N/m; 稳定器居中。

井径 215.9mm, 井斜角 45°, 钻压 150kN。斜直井曲率半径为无穷大, 弯曲井眼为半径 200m 的造斜段。

效应。图 2-11 表明井眼曲率对钻头与地层的作用力影响很大, 增斜力随井眼造斜率的增加迅速线性下降, 而增方位力则随之缓慢线性增加, 其中稳斜、增斜和导向钻具斜率最大, 降斜钻具斜率较小。某一曲率下的增斜钻具在另一曲率下可能产生降斜力, 反之亦然; 某一曲率下的增方位钻具在另一曲率下, 可能产生降方位力, 反之亦然。

#### (4) 主法线方向的影响

井眼的主法线方向即井眼的弯曲方向 (类似于装置角, 增斜井眼主法线方向角为零, 顺时针方向为正) 对增井斜力和增方位力有很大影响。图 2-12 表明, 钻具的增井斜力  $F_b$  与主法线方向的关系为  $F_b = B + A_b \cos(\gamma_f + \pi)$ ; 钻具的增方位力  $F_w$  与主法线方向的关系为  $F_w = A_w \sin(\gamma_f + \pi)$ 。不同钻具的  $B$ 、 $A_b$ 、 $A_w$  的数值不同。按它们的数值由大到小将钻具排序为单弯导向钻具、反向双弯导向钻具、增斜钻具、稳斜钻具、降斜钻具。

#### (5). 井径扩大或稳定器偏心的影响

下部 / 导向钻具组合的变形, 一直受到井眼几何形状的严格约束。当遇到井径扩大或采用偏心稳定器导向钻井系统时, 井眼对钻具的约束条件就发生了变化, 从而影响到钻柱的变形和受力状态。图 2-13 表明, 井径扩大或稳定器偏心对不同钻具的力学特性影

响不同。对 I、II、IV、V 具有近钻头稳定器的钻具影响很大，而对 III 稳定器距钻头很远的钻具影响很小。其规律是井径扩大或稳定器偏心（偏心稳定器窄边向下）导致增井斜力减小、降斜力增加；井径扩大或稳定器偏心使方位力有所增加，但数值很小。对于多稳定器钻具组合，近钻头稳定器与井壁的间隙对钻头侧向力影响最大，离钻头越远的稳定器的间隙对钻头侧向力的影响越小。

#### (6) 钻井液密度的影响

下部/导向钻具组合在充满钻井液的井眼里工作，必然受到浮力的作用。从图 2-14 看出，钻井液密度对钻头侧向力的影响较小。

#### (7) 稳定器安放位置的影响

稳定器安放位置对钻具的力学特性影响是很大的。所谓的“钟摆作用”、“杠杆作用”和“满眼稳斜作用”等主要取决于稳定器安放位置。图 2-15 和图 2-16 分别给出了近钻头稳定器和与其相邻的稳定器安放位置与钻头侧向力的关系曲线。计算表明，这两个稳定器安放位置对钻头侧向力影响很大。当第一个稳定器距钻头足够远时，上述钻具都具有降斜作用。当第一个稳定器距钻头较近时，在同一条件下，不同钻具产生不同的钻头侧向力，即使同一钻具，在不同条件下钻头侧向力也不同。

钻具 IV 和 V 的增井斜力在图示范围内随两稳定器距离的增加而线性增加。单弯钻具 II 的增井斜力在两稳定器间距小于 4.5M 时，随着稳定器间距的增长而迅速增加；反之则略有降低。

#### (8) 导向钻具弯角位置的影响

导向钻具弯角的位置是导向钻具重要的结构参数之一。图 2-17 给出了两种导向钻具的第一弯角和近钻头稳定器的距离与钻头侧向力的关系曲线。随着第一弯角到近钻头稳定器距离的增加，两种导向钻具的增井斜力都迅速直线下降；而增方位力则缓慢线性增加。

图 2-18 给出了反向双弯导向钻具两弯角间距与钻头侧向力的关系曲线。随着弯角间距的增加，钻具的增井斜力迅速直线增加；而增方位力则以缓慢速度线性下降。

#### (9) 导向钻具弯角大小的影响

导向钻具弯角大小是导向钻具重要的结构参数之一。图 2-19 给出了两种导向钻具的钻头侧向力与第一弯角的关系曲线。导向钻具的增井斜力随第一弯角的增加而迅速线性增加；而增方位力则随之缓慢线性减小。

图 2-20 给出了反向双弯导向钻具的钻头侧向力与其第二弯角的关系曲线。导向钻具的增井斜力随第二弯角的增加而迅速线性减小，而增方位力则缓慢线性增大。

#### (10) 导向钻具弯角装置角的影响

弯角的装置角是导向钻具的重要结构参数之一。图 2-21 和图 2-22 分别给出了两种导向钻具的钻头侧向力与第一装置角和反向双弯导向钻具的第二装置角的关系曲线。钻具的增井斜力  $F_b$  与装置角  $\omega$  的关系为  $F_b = B + A_b \cos \omega$ ，而增方位力  $F_w$  与装置角  $\omega$  的关系则为  $F_w = A \sin \omega$ 。

#### 四. 小结

总上所述, 得出下部/导向钻具组合三维小挠度力学分析结论:

1. 本文建立的下部/导向钻具组合三维小挠度力学分析模型比较准确地反映了钻具在井下的受力状态, 是同类模型中较先进的。
2. 应用相邻函数定理可以很方便地处理导向钻具的弯角和装置角。
3. 应用加权余量法、加权目标函数和最优化方法可以较准确地分析钻具的受力和变形, 正确地处理切点处边界不确定的问题, 无须简化微分方程, 效果很好。
4. 利用下部/导向钻具组合三维小挠度力学分析理论, 可以编制出通用的计算机程序。借助于微机, 该程序能迅速计算各种下部/导向钻具组合的挠度、内力及转角, 进而确定钻柱与井壁的接触点及接触力的大小, 同时求得钻头与地层的作用力和钻头转角。
5. 钻压对下部/导向钻具组合的钻头侧向力有些影响但不太显著。
6. 井眼的空间几何形状对下部/导向钻具组合的钻头侧向力和转角影响较大, 在预测井眼轨迹时应给予充分的重视。
7. 离钻头越近的稳定器对钻头的侧向力和转角的影响越大, 越远的越小。通过调节稳定器的数量和位置, 可以在一定范围内控制井眼轨迹。
8. 导向钻具的弯角、装置角及其位置对钻头侧向力和转角影响较大。通过调节这几个参数, 可以有效地控制井眼轨迹。

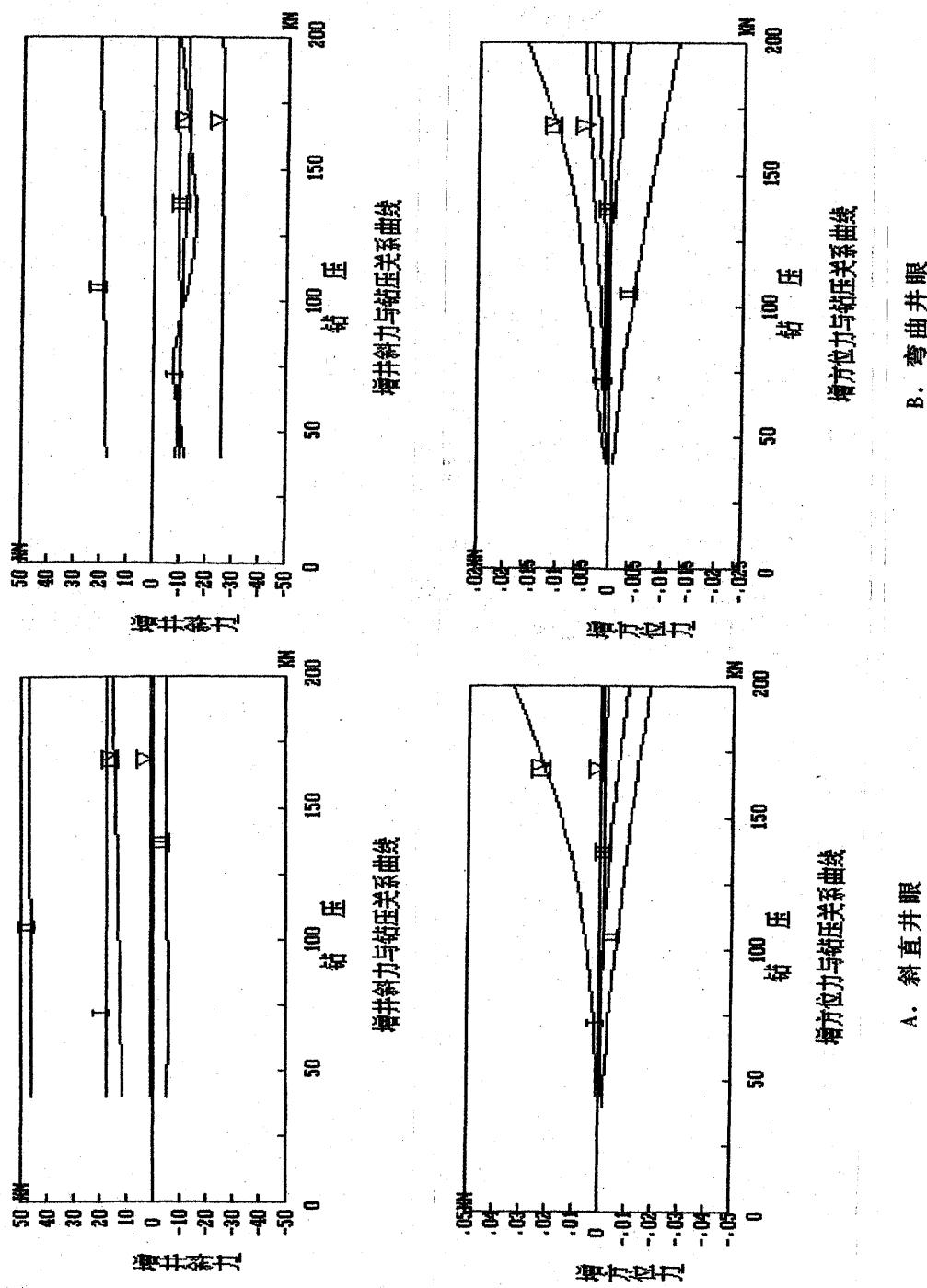


图 2-9 钻头侧向力与钻压的关系

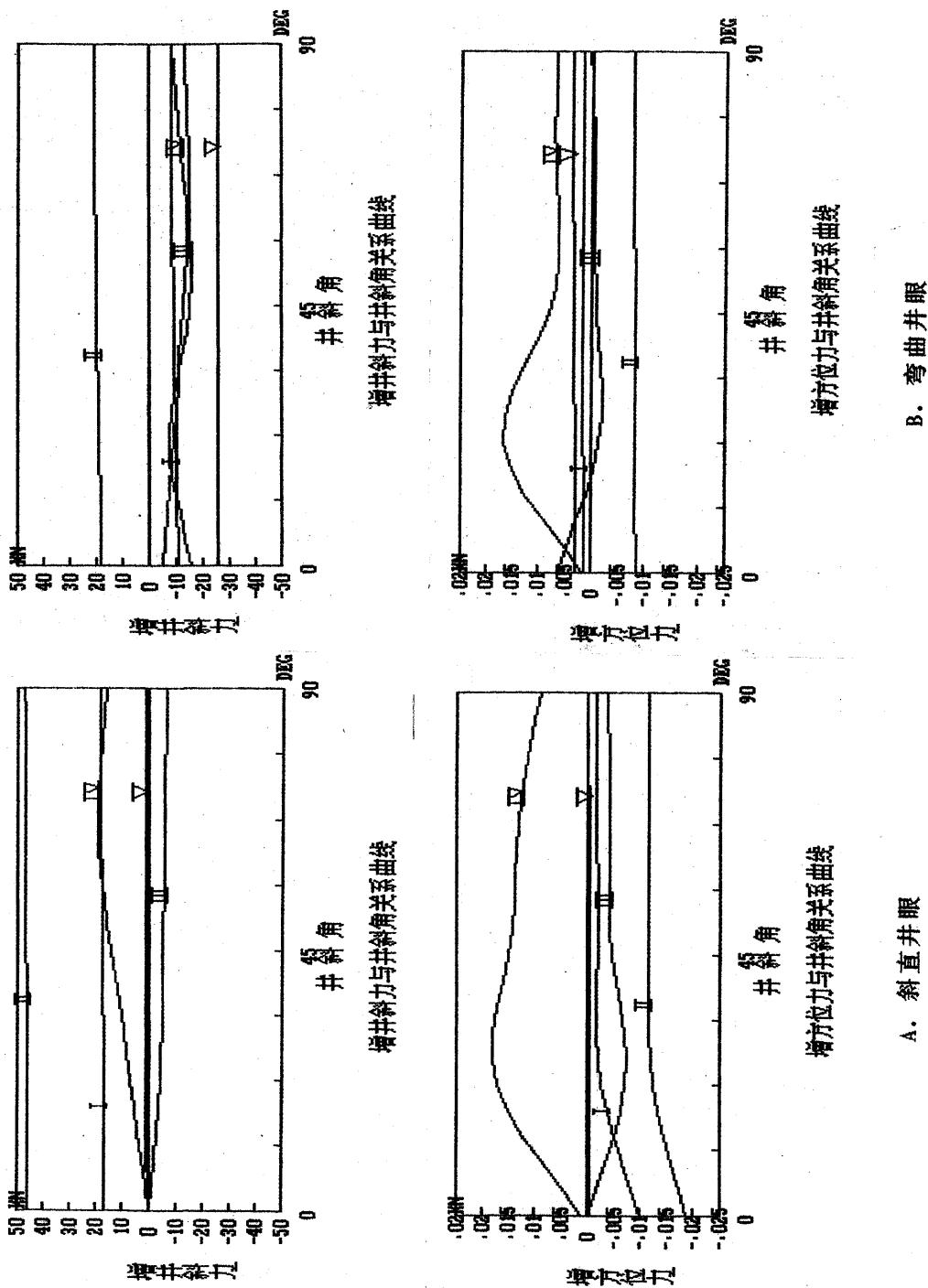
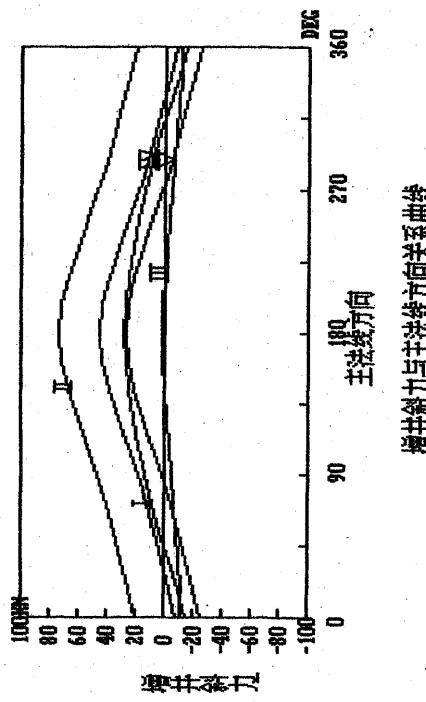
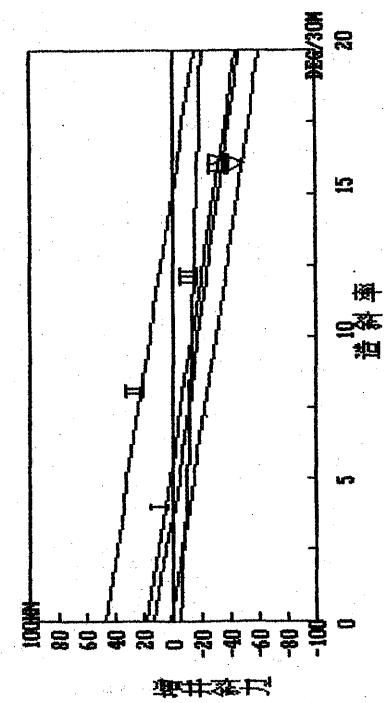


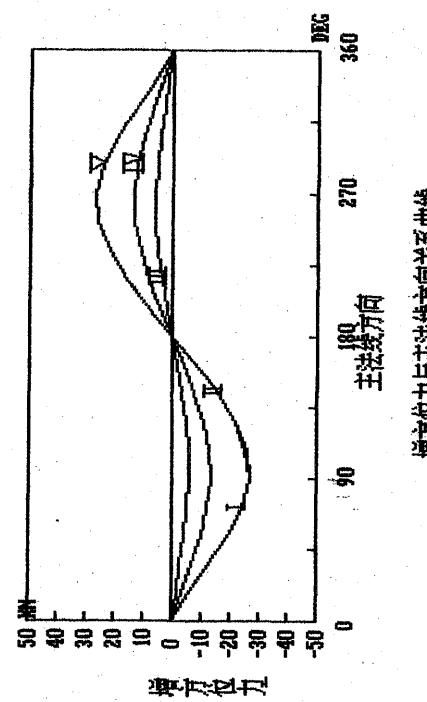
图 2-10 钻头侧向力与井斜角的关系



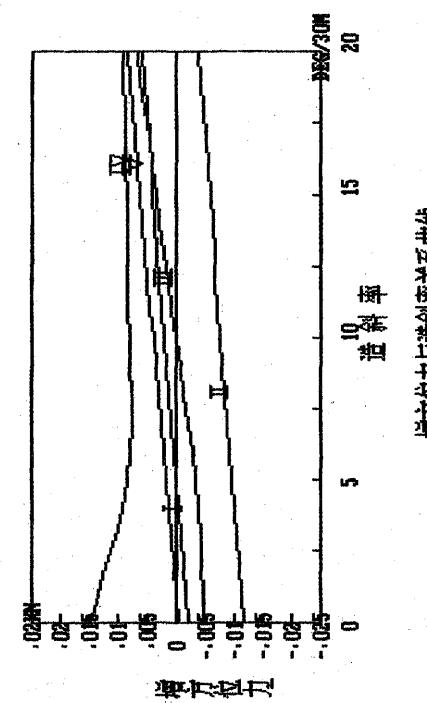
增井斜力与主法线方向关系曲线



增井斜力与造斜率关系曲线



增方位力与主法线方向关系曲线



增方位力与造斜率关系曲线

图 2-11 钻头侧向力与造斜率的关系

图 2-12 钻头侧向力与井眼主法线方向的关系

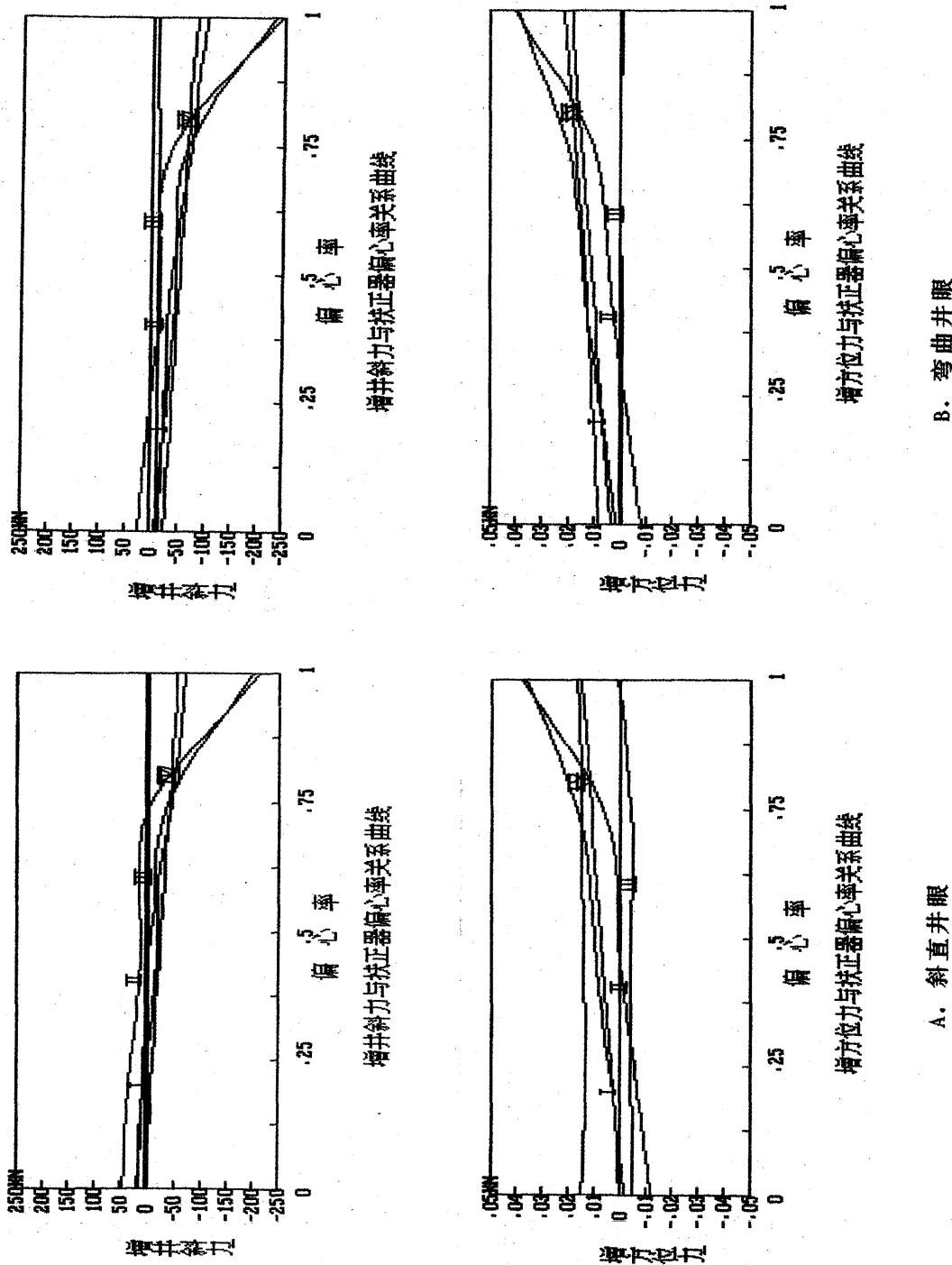
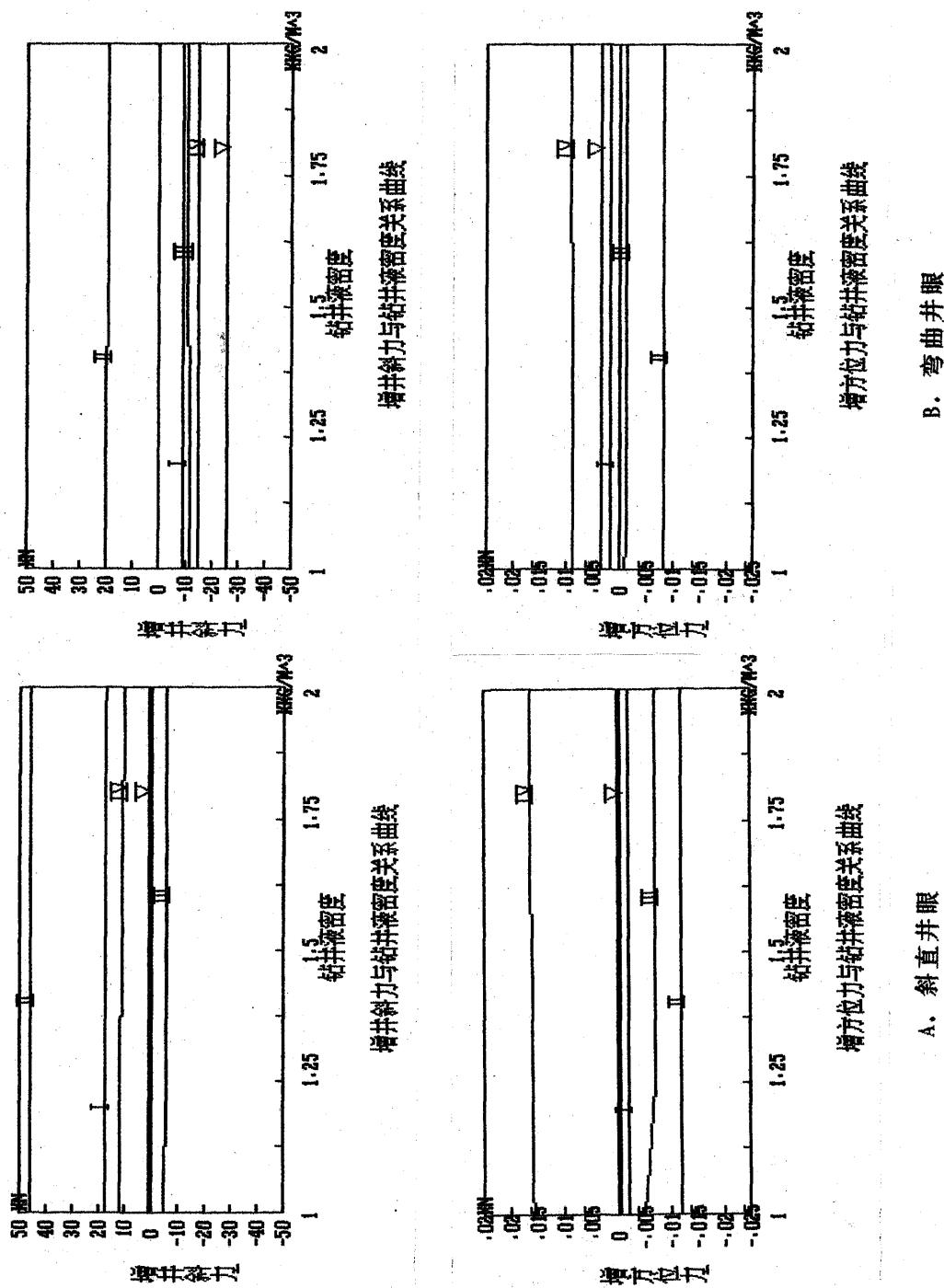
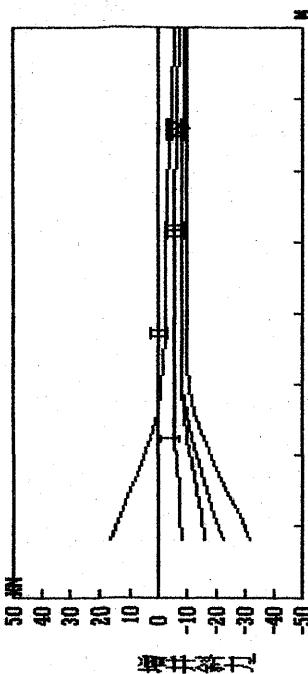


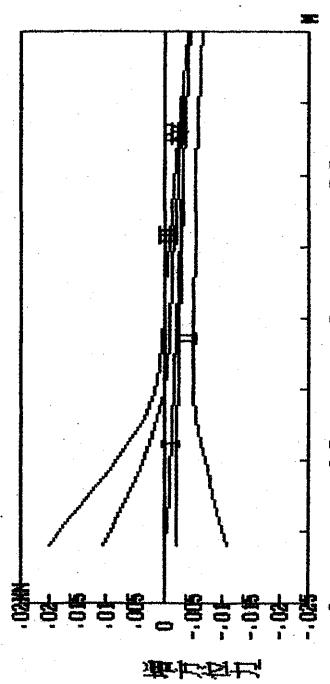
图 2-13 钻头侧向力与稳定器偏心率关系曲线





2.5 钻头至第一扶正器的长度  
增井斜力与钻头至第一扶正器长度关系曲线

增井斜力与钻头至第一扶正器长度关系曲线



2.5 钻头至第一扶正器的长度  
增方位力与钻头至第一扶正器长度关系曲线

增方位力与钻头至第一扶正器长度关系曲线

A. 斜直井眼

B. 弯曲井眼

图 2-15 钻头侧向力与钻头至第一稳定器长度关系曲线

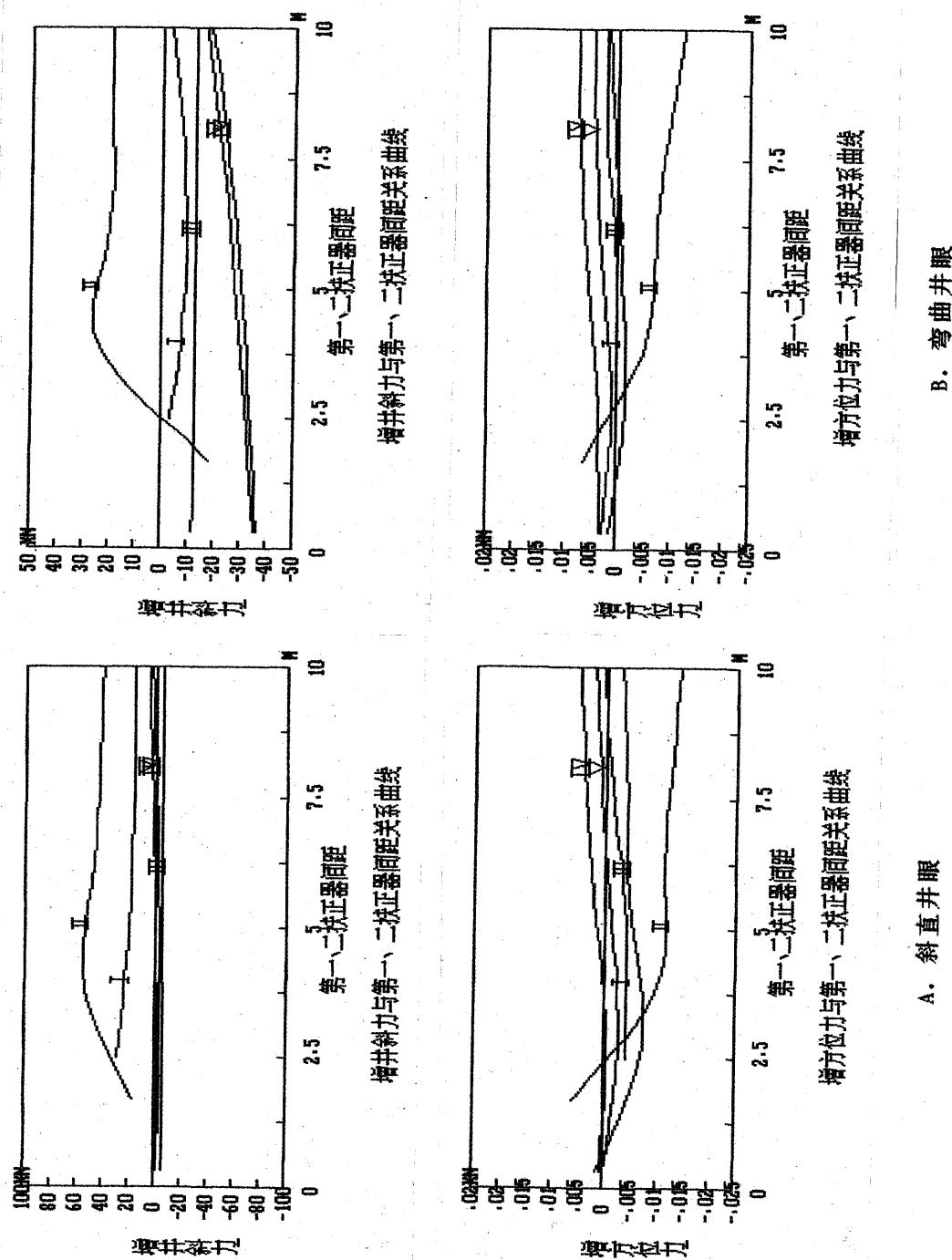
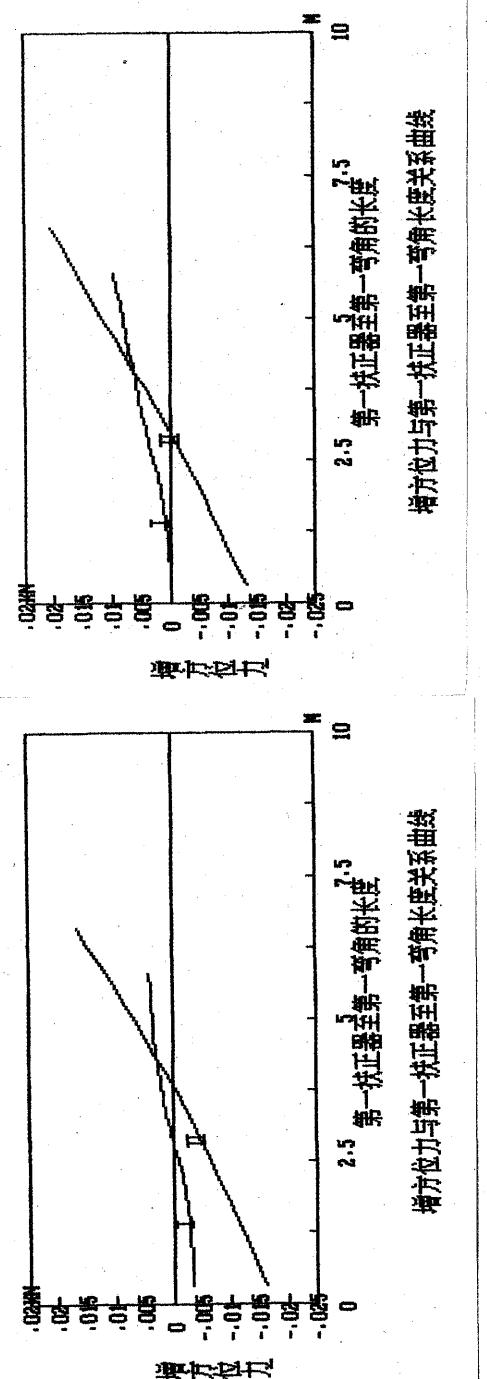
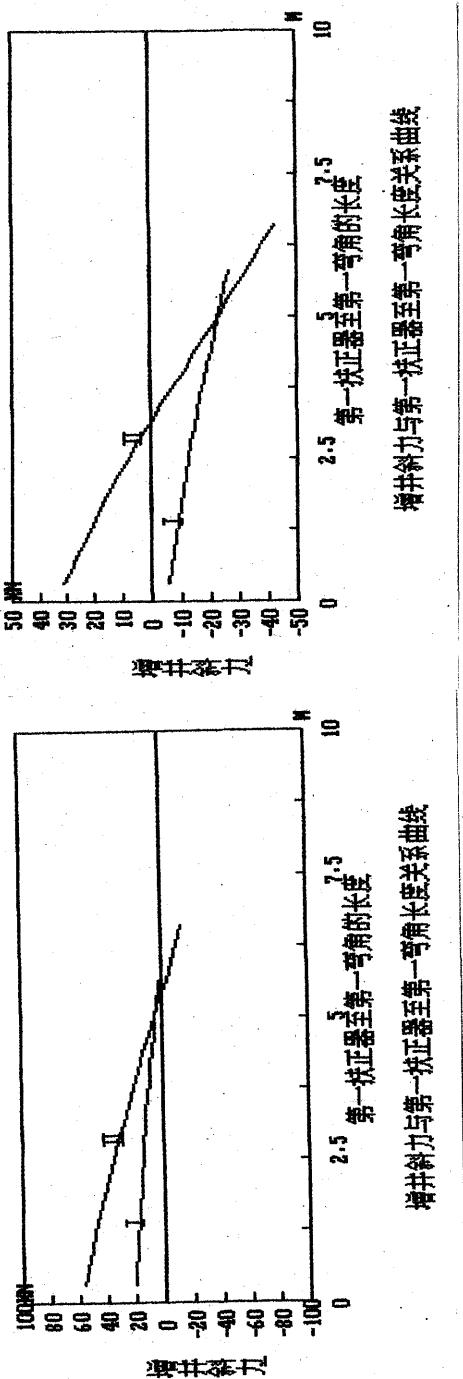
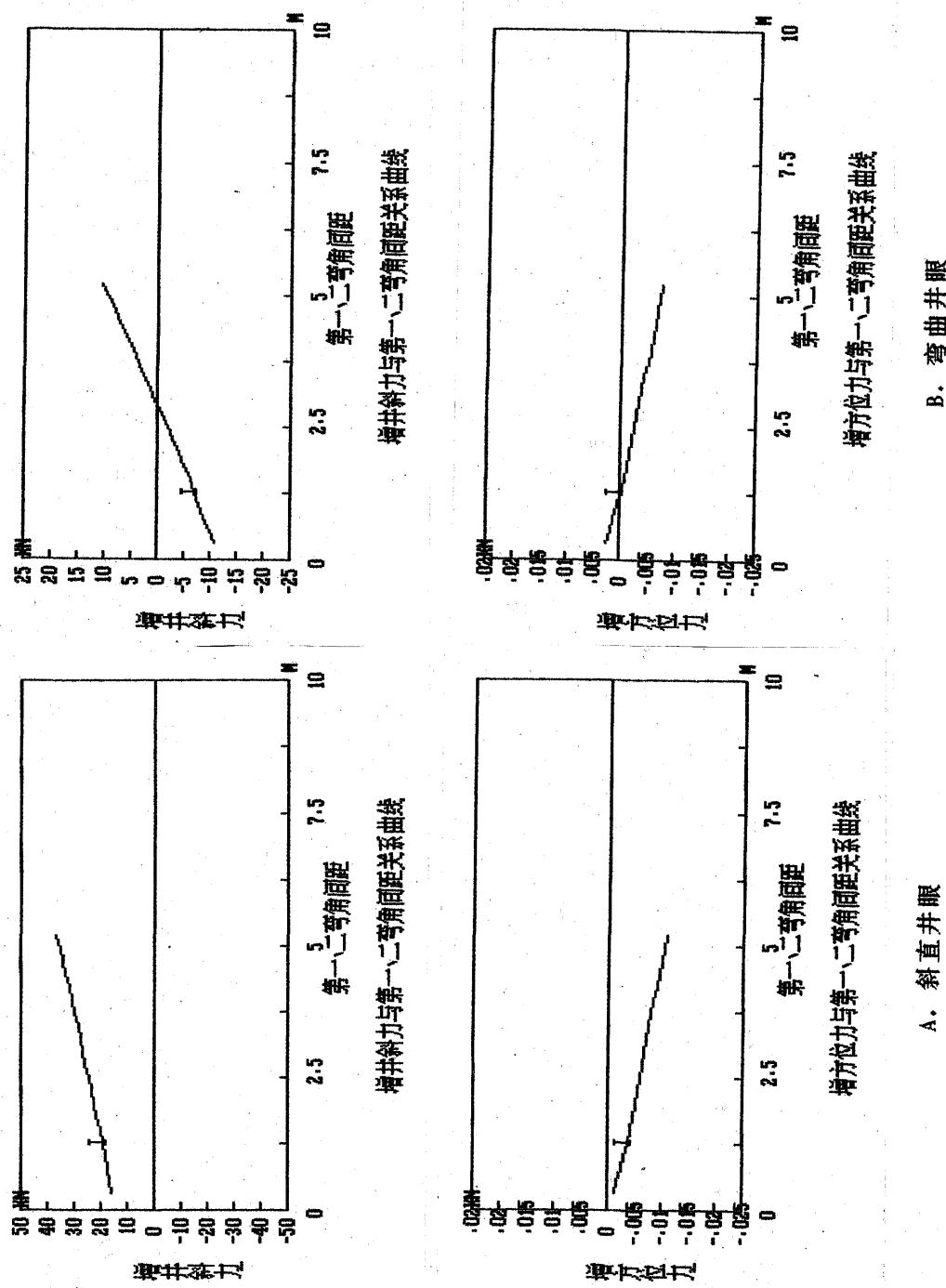


图 2-16 钻头侧向力与第一、二扶正器间距的关系



A. 斜直井眼      B. 弯曲井眼

图 2-17 钻头侧向力与第一稳定器至第一弯角长度的关系



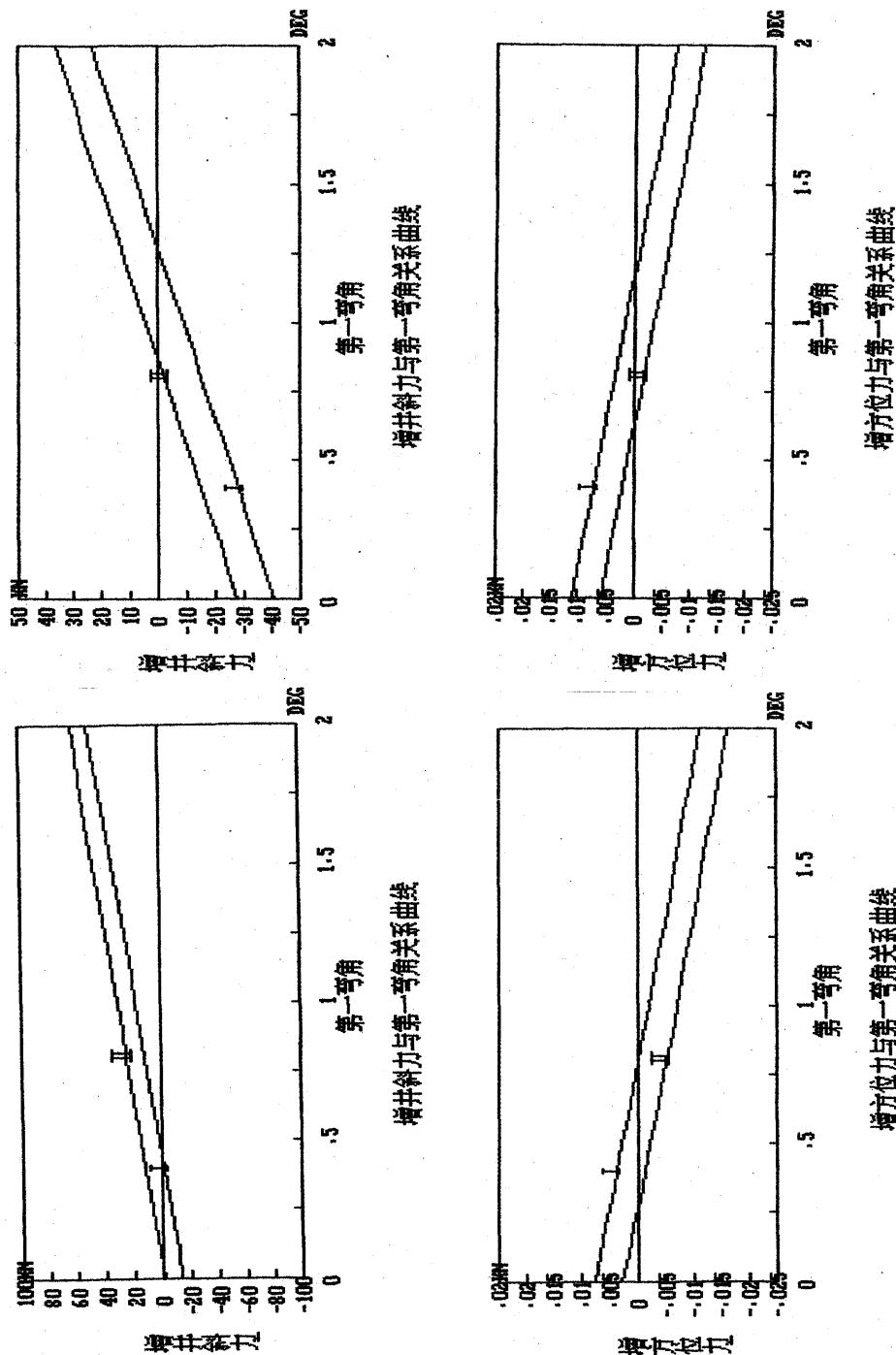


图 2-19 钻头侧向力与导向钻具第一弯角的关系

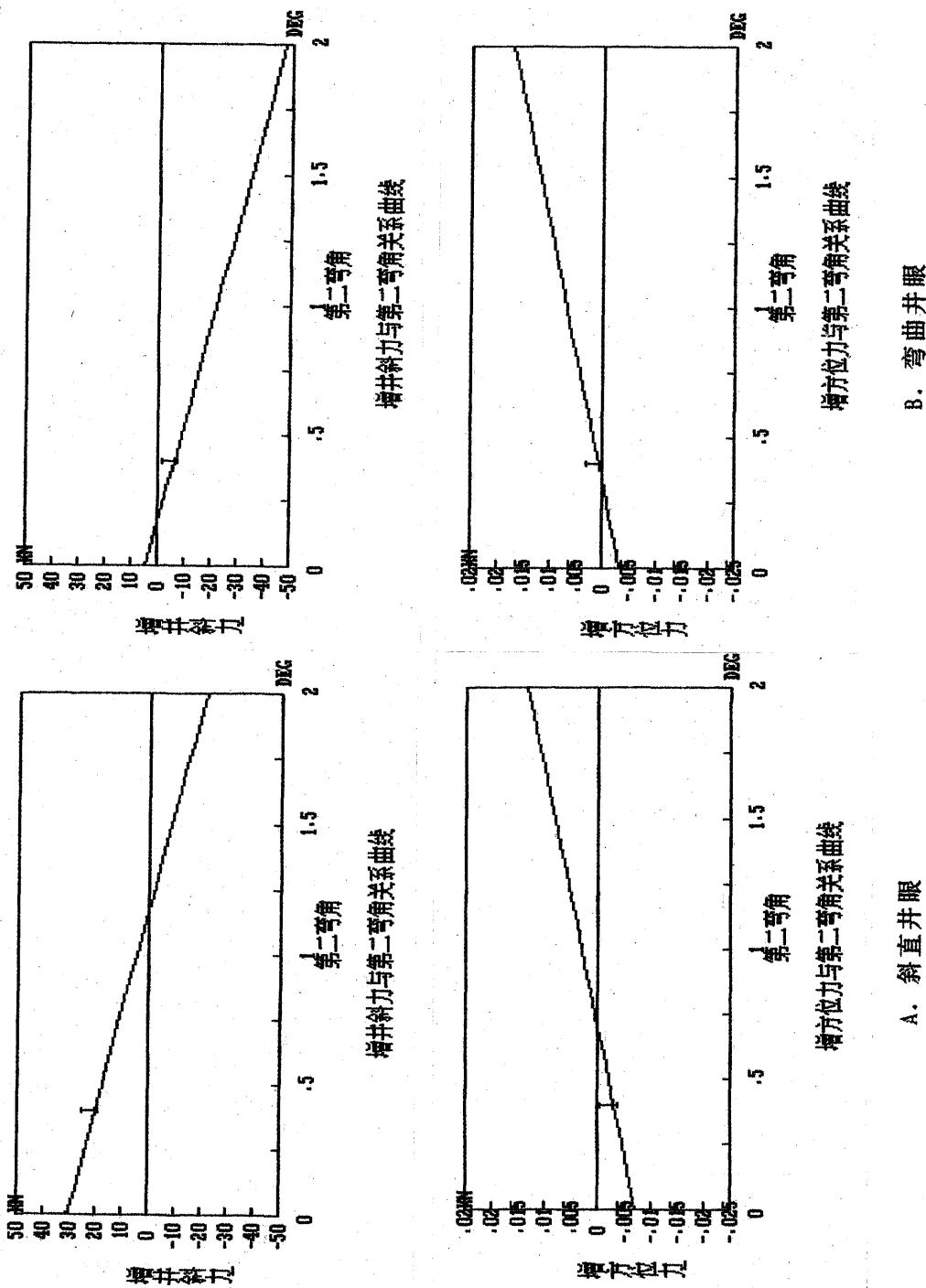


图 2-20 钻头侧向力与导向钻具第二弯角的关系

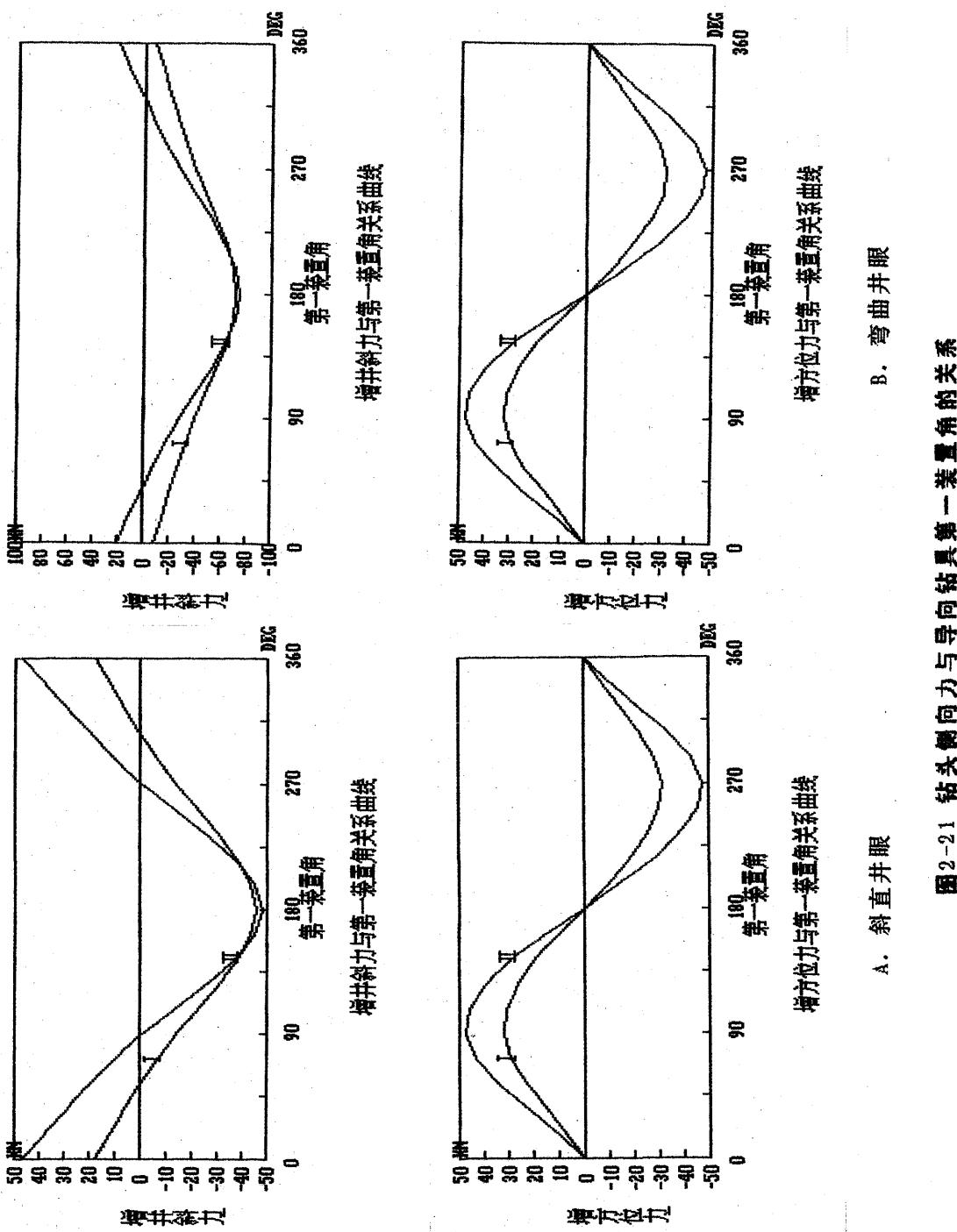


图 2-21 钻头侧向力与导向钻具第一工具面角的关系

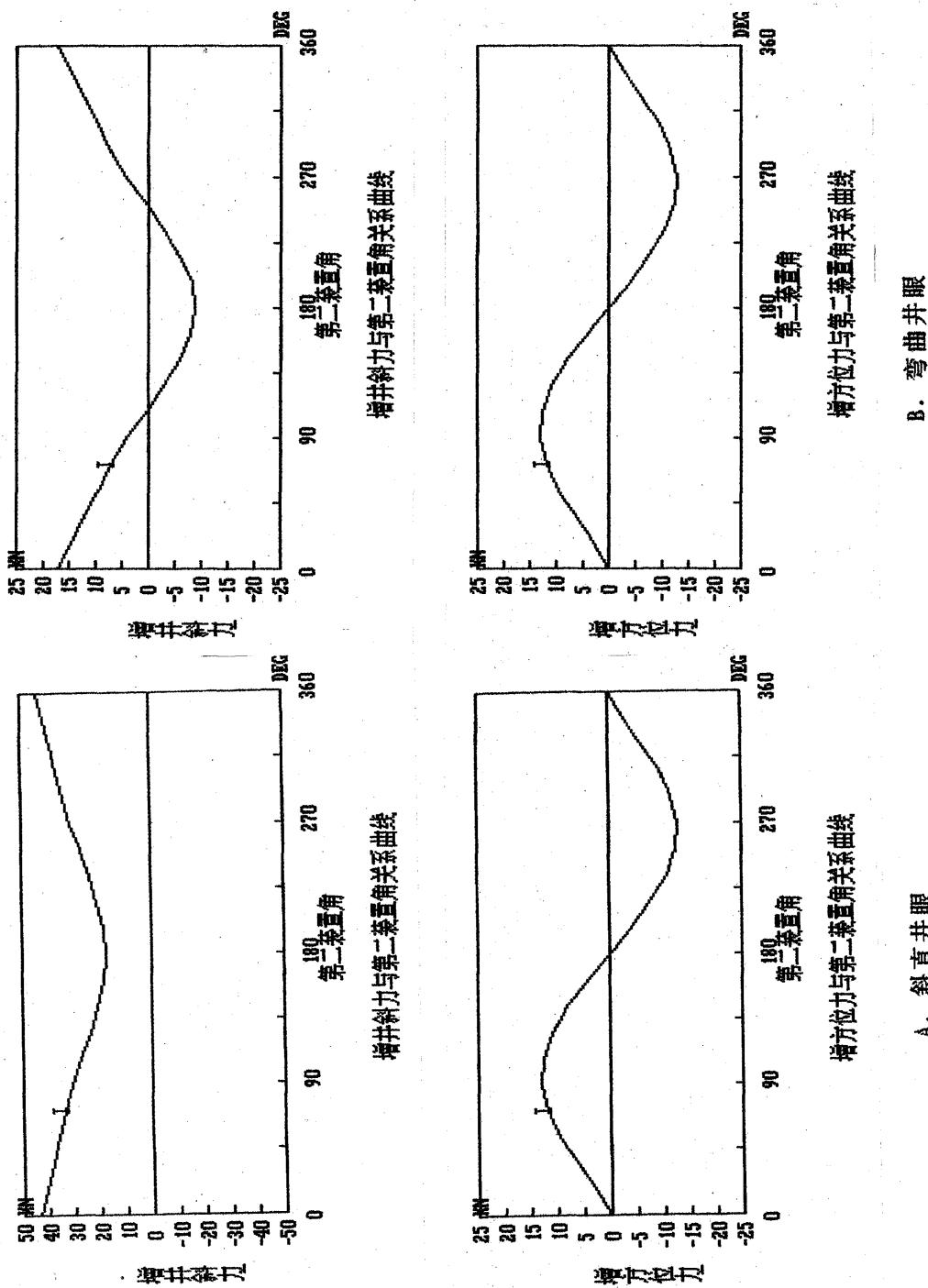


图 2-22 钻头侧向力与导向钻具第二工具面角的关系

## 第二节 下部/导向钻具组合大挠度权余法力学分析

在结构分析中,往往采用小变形假设,这对于许多工程问题是近似可取的。但是,如果结构的变形较大,则小变形就会产生明显的误差,以致不能满足实际问题的需要,这是就有必要进行大变形分析。对于普通的下部钻具组合来说,当井眼曲率不大时,小挠度分析一般可以满足工程要求;但当井眼曲率较大或/和采用导向钻具时,钻具的挠度较大,小挠度分析则存在较大误差,需要进行大挠度分析。

### 一. 下部/导向钻具组合大挠度力学分析的数学模型

#### 1. 参考坐标系

见本章第一节。

#### 2. 微分方程

将下部/导向钻具组合视为纵横弯曲梁,由  $n-1$  个稳定器、接触点和弯角分割成  $n$  个独立的结构单元。钻具处在三维弯曲井眼内,受自重、钻压、扭矩、井壁支反力及钻井液静水压力等作用,产生空间大挠度弯曲。

取第  $i$  段钻柱为研究对象,根据力平衡方程

$$\frac{d\vec{F}_i}{dl} = - \vec{H}_i$$

力矩平衡方程

$$\frac{d\vec{M}_i}{dl} = \vec{F}_i \times \vec{t}_i$$

和本构方程

$$\vec{M}_i = E_i I_i (\vec{t}_i \times \frac{d\vec{t}_i}{dl}) + G_i J_i \frac{dr_{ci}}{dl} \vec{t}_i$$

导出钻具大挠度微分方程组:

$$(V'_i W''_i - W'_i V''_i) E_i I_i + T'_i U''_i = T_{yi} W'_i - T_{zi} V'_i \quad (2.68)$$

$$(W'_i U''_i - U'_i W''_i) E_i I_i + T'_i V''_i = T_{zi} U'_i - T_{xi} W'_i \quad (2.69)$$

$$(U'_i V''_i - V'_i U''_i) E_i I_i + T'_i W''_i = T_{xi} V'_i - T_{yi} U'_i \quad (2.70)$$

$$\text{其中: } (\cdot)' = \frac{d(\cdot)}{dl} \quad (\cdot)'' = \frac{d^2(\cdot)}{dl^2} \quad (\cdot)''' = \frac{d^3(\cdot)}{dl^3}$$

$\bar{F}_i = T_{xi}\vec{i} + T_{yi}\vec{j} + T_{zi}\vec{k}$  为钻柱内力;

$T_{xi}, T_{yi}, T_{zi}$  —— i段钻柱内力沿  $x, y, z$  坐标方向的分量;

$\bar{H}_i$  —— 单位长度钻柱的外力, 若略去钻柱与井壁的摩擦力:

$$\bar{H}_i = P_i \sin\alpha_i \vec{i} - P_i \cos\alpha_i \vec{j} \quad (2.71)$$

$$\vec{t}_i = \frac{dU_i}{dl} \vec{i} + \frac{dV_i}{dl} \vec{j} + \frac{dW_i}{dl} \vec{k} \quad (2.72)$$

$U_i, V_i, W_i$  —— i段钻柱轴线坐标;

其它与本章第一节相同。

利用

$$T_{xi} = S_{xi} - P_i l \sin\alpha_i \quad (2.73)$$

$$T_{yi} = S_{yi} \quad (2.74)$$

$$T_{zi} = -WB_i + P_i l \cos\alpha_i \quad (2.75)$$

其中:  $S_{xi}$  —— i钻柱下部x方向的分力,  $i=1$  时为降斜力;

$S_{yi}$  —— i钻柱下部y方向的分力,  $i=1$  时为增方位力;

$WB_i$  —— i钻柱下部z方向的压力,  $i=1$  时为钻压。

则(2.68)~(2.70) 可写成:

$$\begin{aligned} & (V_i' W_i''' - W_i' V_i'') E_i I_i + T_i U_i'' \\ & = S_{yi}' W_i' - (P_i \cos\alpha_i l - WB_i) V_i' \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\begin{aligned} & (W_i' U_i''' - U_i' W_i'') E_i I_i + T_i V_i'' \\ & = (P_i \cos\alpha_i l - WB_i) U_i' - (S_{xi} - P_i \sin\alpha_i l) W_i' \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} & (U_i' V_i''' - V_i' U_i'') E_i I_i + T_i W_i'' \\ & = (S_{xi} - P_i \sin\alpha_i l) V_i' - S_{yi} U_i' \end{aligned} \quad (2.78)$$

由(2.76), (2.77)导出

$$S_{xi} = -\frac{1}{W_i(0)} \{ [W_i'(0)U_i'''(0) - U_i'(0)W_i''(0)]E_i I_i + T_i V_i''(0) + WB_i U_i'(0) \} \quad (2.79)$$

$$S_{yi} = \frac{1}{W_i(0)} \{ [V_i'(0)W_i'''(0) - W_i'(0)V_i''(0)]E_i I_i + T_i U_i''(0) - WB_i V_i'(0) \} \quad (2.80)$$

### 3. 边界条件和连续条件

#### (1) 钻头处

根据坐标系的取法, 钻头位移为零,

$$U_1(0) = 0, \quad V_1(0) = 0, \quad W_1(0) = 0 \quad (2.81)$$

此外, 钻头与地层间无弯矩作用, 为此

$$U_1''(0)^2 = 0, \quad V_1''(0)^2 = 0, \quad W_1''(0)_z = 0 \quad (2.82)$$

#### (2) 稳定器处

在各稳定器或接触点处, 钻柱位于井眼中心或在某一方向上偏离井眼中心一定距离, 稳定器两侧钻柱坐标及其一次导数连续、弯矩连续:

$$U_i(L_i) = U_{i+1}(0) = X_i + e c_i \cos \delta_i \quad (2.83)$$

$$V_i(L_i) = V_{i+1}(0) = Y_i + e c_i \sin \delta_i \quad (2.84)$$

$$W_i(L_i) = W_{i+1}(0) = Z_i \quad (2.85)$$

$$U_i'(L_i) = U_{i+1}'(0) \quad (2.86)$$

$$V_i'(L_i) = V_{i+1}'(0) \quad (2.87)$$

$$W_i'(L_i) = W_{i+1}'(0) \quad (2.88)$$

$$E_i I_i U_i''(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} U_{i+1}''(0) \quad (2.89)$$

$$E_i I_i V_i''(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} V_{i+1}''(0) \quad (2.90)$$

$$E_i I_i W_i''(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} W_{i+1}''(0) \quad (2.91)$$

## (3) 在弯角处

在弯角两侧钻柱坐标连续, 导数有一个与弯角和装置角有关的差值, 弯矩连续、内力连续, 为此,

$$U_i(L_i) = U_{i+1}(0) \quad (2.92)$$

$$V_i(L_i) = V_{i+1}(0) \quad (2.93)$$

$$W_i(L_i) = W_{i+1}(0) \quad (2.94)$$

$$U'_i(L_i) = U'_{i+1}(0) + \sin\theta_i \cos\omega_i \quad (2.95)$$

$$V'_i(L_i) = V'_{i+1}(0) - \sin\theta_i \sin\omega_i \quad (2.96)$$

$$W'_i(L_i) = [1 - U'_i(L_i)^2 - V'_i(L_i)^2]^{1/2} \quad (2.97)$$

$$E_i I_i U''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} U''_{i+1}(0) \quad (2.98)$$

$$E_i I_i V''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} V''_{i+1}(0) \quad (2.99)$$

$$E_i I_i W''_i(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} W''_{i+1}(0) \quad (2.100)$$

$$T_{xi}(L_i) = S_{x i+1} \quad (2.101)$$

$$T_{yi}(L_i) = S_{y i+1} \quad (2.102)$$

$$T_{zi}(L_i) = -WB_{i+1} \quad (2.103)$$

其中:  $\theta_i$  ——  $i$ 段钻柱上端弯角;  
 $\omega_i$  ——  $i$ 段钻柱上端弯角的装置角。

## (4) 在切点处

在切点处, 钻柱躺在井壁下侧, 其坐标的一、二次导数均与该点井眼的对应值近似相等:

$$U_n(L_n) = X_n + (D_w - D_{O_n})/2 \quad (2.104)$$

$$V_n(L_n) = Y_n \quad (2.105)$$

$$W_n(L_n) = Z_n \quad (2.106)$$

$$U'_n(L_n) \doteq X'_n \quad (2.107)$$

$$V'_n(L_n) \doteq Y'_n \quad (2.108)$$

$$W'_n(L_n) \doteq Z'_n \quad (2.109)$$

$$U''_n(L_n) \doteq X''_n \quad (2.110)$$

$$V''_n(L_n) \doteq Y''_n \quad (2.111)$$

$$W''_n(L_n) \doteq Z''_n \quad (2.112)$$

(5) 钻具变形受到井壁的限制，必须满足

$$[(U_i - X)^2 + (V_i - Y)^2 + (W_i - Z)^2]^{1/2} \leq (D_w - D_{O_i})/2 \quad (2.113)$$

## 二. 加权余量解与解析解的比较

在第一节中曾提到，加权余量法在求解非线性问题时特别有效，下面就以直杆压屈后的大挠度非线性问题为例来说明其精度。

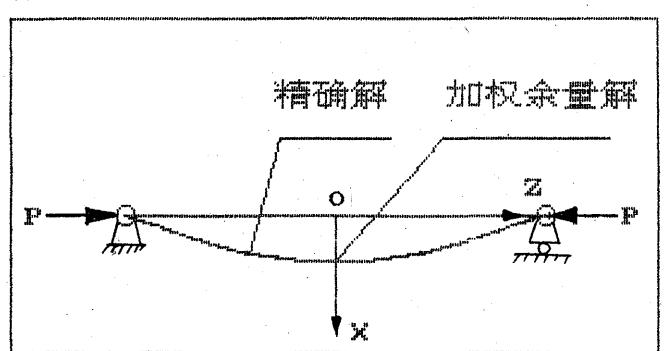


图2-23 直杆压曲大挠度解析解与权余解比较

两端绞支的无重直管，长 $2L=10M$ ，外径 $178mm$ ，内径 $71mm$ ，在轴向压力 $P=1010 KN$ 的作用下于 $XOZ$ 平面内发生屈曲，变形曲线的微分方程和边界条件分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{dZ}{dl} \cdot \frac{d^3X}{dl^3} - \frac{dX}{dl} \cdot \frac{d^3Z}{dl^3} \right) EI + P \frac{dX}{dl} = 0 \\ \left( \frac{dZ}{dl} \right)^2 + \left( \frac{dX}{dl} \right)^2 = 1 \end{array} \right. \quad (2.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X(-L) = X(L) = 0 \\ \frac{d^2X(-L)}{dl^2} = \frac{d^2X(L)}{dl^2} = 0 \\ Z(0) = 0 \end{array} \right. \quad (2.B)$$

令试函数

$$X = \sum_{r=0}^{10} a_r l^r \quad (2.C)$$

将其代入到边界条件 (2.B) 中, 得到四个独立方程, 再从直管内均匀选取七个配点, 令  $X$  在这些配点上满足微分方程 (2.A), 得到七个独立方程, 共有十一个独立方程, 已完全确定试函数  $X$  的全部系数, 然后再利用上述微分方程和边界条件计算  $Z$  值。现将其数值解与精确解析解(参见附录 C)数值列于表 2-3 中。从表中可以看出, 加权余量法用于求解该问题的相对误差均小于 1%, 其中还包括了计算机的舍入误差, 由此可见, 加权余量法很适用于求解钻柱大挠度问题。

表 2-3 直管压屈大挠度加权余量解与解析解的比较

序号	曲线坐标 (M)	加权余量解(M)		解析解(M)	
		Z坐标	X坐标	Z坐标	X坐标
1	0	0	1.24298	0	1.24355
2	1	.997061	1.18112	.98843	1.1827
3	2	1.97943	1.00231	1.9668	1.00606
4	3	2.93898	.726048	2.92839	.73089
5	4	3.87639	.380795	3.87283	.384137
6	5	4.80068	-4.74e-9	4.80636	0

### 三. 下部/导向钻具大挠度加权余量法分析

#### 1. 下部/导向钻具大挠度力学分析的加权余量解

取试函数

$$U_i = U_i(0) + \sum_{r=1}^{10} a_{ir} L_i^r \quad (2.114)$$

$$V_i = V_i(0) + \sum_{r=1}^{10} b_{ir} L_i^r \quad (2.115)$$

$$W_i = W_i(0) + \int_0^L [1 - (U_i')^2 - (V_i')^2]^{1/2} dl \quad (2.116)$$

若该试函数在钻柱内满足(2.76)~(2.78), 在边界上满足(2.81)~(2.113), 则为所求钻柱中心线坐标。

将(2.116)式代入(2.76)~(2.78)式中, 可以发现由(2.76)和(2.77)式可以导出(2.78)式, 即(2.76)、(2.77)和(2.78)式在(2.116)成立的条件下不是相互独立的。试函数只要满足(2.76)和(2.77)式, (2.78)式就自动满足, 为此, 在以后的分析中就略去(2.78)式和边界条件中有关W的项。

若该段钻柱左端为稳定器, 则 $U_i(0)$ 、 $V_i(0)$ 由(2.83)和(2.84)确定; 若该段钻柱为一弯角, 则 $U_i(0)$ 、 $V_i(0)$ 为一未知量, 用下式表示:

$$U_i(0) = U_i(L_i) - \sum_{r=1}^{10} a_{ir} L_i^r \quad (2.117)$$

$$V_i(0) = V_i(L_i) - \sum_{r=1}^{10} b_{ir} L_i^r \quad (2.118)$$

若该段钻柱两端均为弯角, 则根据位移连续条件, 有

$$U_i(0) = U_{i+1}(L_{i+1}) - \sum_{r=1}^{10} a_{ir} L_i^r - \sum_{r=1}^{10} a_{i+1r} L_{i+1}^r \quad (2.119)$$

$$V_i(0) = V_{i+1}(L_{i+1}) - \sum_{r=1}^{10} b_{ir} L_i^r - \sum_{r=1}^{10} b_{i+1r} L_{i+1}^r \quad (2.120)$$

很明显, 试函数(2.114)和(2.115)自动满足钻柱左端位移边界条件, 若令钻柱右端的位移及其一至二阶导数已知, 则有

$$U_i(L_i) = U_i(0) + \sum_{r=1}^{10} a_{ir} L_i^r \quad (2.121)$$

$$V_i(L_i) = V_i(0) + \sum_{r=1}^{10} b_{ir} L_i^r \quad (2.122)$$

$$U_i'(L_i) = \sum_{r=1}^{10} r a_{ir} L_i^{r-1} \quad (2.123)$$

$$V_i'(L_i) = \sum_{r=1}^{10} r b_{ir} L_i^{r-1} \quad (2.124)$$

$$U_i''(L_i) = \sum_{r=1}^{10} r(r-1) a_{ir} L_i^{r-2} \quad (2.125)$$

$$V_i'''(L_i) = \sum_{r=1}^{10} r(r-1)b_{ir} L_i^{r-2} \quad (2.126)$$

六个独立方程, 若想求  $a_{ir}$ ,  $b_{ir}$  ( $r=1, 2, \dots, 10$ ) 共 20 个系数, 还需在钻柱内取七个配点, 使试函数在这些配点上满足微分方程, 这样又产生如下十四个独立方程:

$$\begin{aligned} & (V_{ij}' W_{ij}''' - W_{ij}' V_{ij}''') E_i I_i + T_i U_{ij}''' \\ & = S_{yi} W_{ij}' - (P_i \cos \alpha_i l_{ij} - W B_i) V_{ij}' \end{aligned} \quad (2.127)$$

$$\begin{aligned} & (W_{ij}' U_{ij}''' - U_{ij}' W_{ij}''') E_i I_i + T_i V_{ij}''' \\ & = (P_i \cos \alpha_i l_{ij} - W B_i) U_{ij}' - (S_{xi} - P_i \sin \alpha_i l_{ij}) W_{ij}' \end{aligned} \quad (2.128)$$

其中:  $I_{ij} = j L_i / 8$  ( $j=1, 2, \dots, 7$ ),  $U_{ij}', V_{ij}', W_{ij}', U_{ij}''', V_{ij}''', W_{ij}''', U_{ij}'''''$ ,  $V_{ij}'''''$ ,  $W_{ij}'''''$  分别为  $i$  段  $j$  点坐标的一至三阶导数。

由 (2.121) 至 (2.128) 式组成二十个独立方程的非线性方程组, 用非线性最小二乘法, 可以完全确定  $i$  段钻柱中心坐标。

在第一节曾提到, 由于切点状态较为复杂和权余法及计算误差, 用从上往下逐步推算的方法使钻头与地层间无弯矩的条件得以满足是十分困难的, 为此, 还需要把上述问题转化为两重最优化问题。第一重优化是假设一切点长度, 计算最佳解条件下, 边界和内部的误差值。第二重优化是根据总误差最小的原则确定切点长度。

在第一重优化中, 假设试函数的  $a_{ir}$ ,  $b_{ir}$  为自变量, 内部残值和边界残值为误差函数项, 即

$$\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n \times 20)^T \quad (2.129)$$

其中:  $X_{(i-1) \times 20+r} = a_{ir}$   
 $X_{(i-1) \times 20+10+r} = b_{ir}$   
 $(i=1, 2, \dots, n; r=1, 2, \dots, 10)$

$$\bar{E} = (E_1, E_2, \dots, E_{2n \times n})^T \quad (2.129)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 E_{20 \times (i-1)+j} &= [(V'_{ij}W''_{ij} - W'_{ij}V'''_{ij})E_i I_i + T_i U''_{ij} \\
 &\quad - S_{yi}W'_{ij} + (P_i l_{ij} \cos \alpha_i - W B_i) V'_{ij}] / E_i I_i \\
 E_{20 \times (i-1)+7+j} &= [(W'_{ij}U''_{ij} - U'_{ij}W'''_{ij})E_i I_i + T_i V''_{ij} \\
 &\quad - (P_i l_{ij} \cos \alpha_i + W B_i) U'_{ij} + (S_{xi} - P_i l_{ij} \sin \alpha_i) W'_{ij}] / E_i I_i \\
 E_{20 \times (i-1)+15} &= U_i(0) + \sum_{r=1}^{10} a_{ir} L_i^r - U_{i+1}(0) \\
 E_{20 \times (i-1)+16} &= V_i(0) + \sum_{r=1}^{10} b_{ir} L_i^r - V_{i+1}(0) \\
 E_{20 \times (i-1)+17} &= [\sum_{r=1}^{10} r a_{ir} L_i^{r-1} - U'_{i+1}(0) - \sin \theta_i \cos \omega_i] C K_i \\
 E_{20 \times (i-1)+18} &= [\sum_{r=1}^{10} r b_{ir} L_i^{r-1} - V'_{i+1}(0) + \sin \theta_i \sin \omega_i] C K_i \\
 E_{20 \times (i-1)+19} &= [\sum_{r=1}^{10} r(r-1) a_{ir} L_i^{r-2} - U''_{i+1}(0) E_{i+1} I_{i+1} / E_i I_i] C K_i \\
 E_{20 \times i} &= [\sum_{r=1}^{10} r(r-1) b_{ir} L_i^{r-2} - V''_{i+1}(0) E_{i+1} I_{i+1} / E_i I_i] C K_i \\
 (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, 7) \\
 E_{20 \times n+2 \times i-1} &= \begin{cases} 0 & (\theta_i = 0) \\ (S_{xi} - P_i L_i \sin \alpha_i - S_{x_{i+1}}) / E_i I_i & (\theta_i \neq 0) \end{cases} \\
 E_{20 \times n+2 \times i} &= \begin{cases} 0 & (\theta_i = 0) \\ (S_{yi} - S_{y_{i+1}}) / E_i I_i & (\theta_i \neq 0) \end{cases} \\
 (i=1, 2, \dots, n-1) \\
 E_{22 \times n-1} &= U''_1(0)
 \end{aligned}$$

$$E_{22 \times n} = V_1''(0)$$

该切点长度下的总误差函数为

$$EO = \min_{\vec{x}} (\vec{E}^T \cdot \vec{E}) \quad (2.130)$$

这一优化过程采用了非线性最小二乘法。

在第二重优化中，初步选定三个切点长度，针对每个切点长度计算EO值，再用三点二次插值法确定实际的切点长度。

整个优化过程可用下式表示：

$$\min_{l_n} [\min_{\vec{x}} (\vec{E}^T \cdot \vec{E})] \quad (2.131)$$

使(2.131)式成立的各段试函数，就是整个导向钻具组合的大挠度位移函数。

钻柱与井壁接触的判断、处理与第一节中相同，见(2.59)~(2.61)式。

(1) 增井斜力、增方位力的计算

钻头的增井斜力：

$$F_b = -S_{x1} \quad (2.132)$$

钻头的增方位力：

$$F_w = S_{y1} \quad (2.133)$$

(2) 钻头的偏转角

与第一节同，见(2.64)和(2.65)式。

(3) 井壁对稳定器的支撑力

井壁对i个稳定器的支撑力在x方向的分量

$$RX_i = -S_{x,i+1} + S_{x,i} - P_i L_i \sin \alpha_i \quad (2.134)$$

井壁对i个稳定器的支撑力在y方向的分量

$$RY_i = S_{y,i} - S_{y,i+1} \quad (2.135)$$

## 2. 导向钻具组合三维大挠度力学分析程序

利用上述加权余量法分析结果，可以编制出通用的导向钻具三维大挠度静态分析程序(程序框图如图2-23所示)，借助于微机便能计算各种导向钻具组合任意一点的挠度、转角及内力，包括钻头的受力和转角。

运行导向钻具组合三维大挠度静态力学分析程序时，要求输入的数据可分为导向钻具结构参数、井眼几何参数和操作参数三大类。其中导向钻具结构参数包括各段钻铤的长度、外径、内径、线重密度、弹性模量、上端弯角及其装置角；井眼几何参数为井斜角、曲率半径和曲率中心方向及井眼扩大系数；操作参数包括钻压、钻头直径、钻井液密

度。框图中导向钻具大挠度力学模型、最优化方法确定切点长度和位移函数的程序块是该程序的中心，该段程序长，占内存多，循环多耗时长。笔者用True basic 的矩阵运算语句对矩阵进行运算，有效地避免了未知数个数多时，系数矩阵降秩问题。该大挠度力

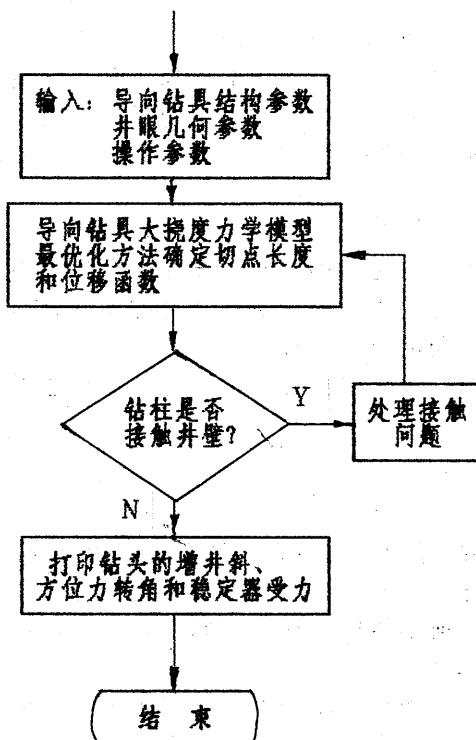


图2-23 导向钻具三维大挠度力学分析程序框图

学分析程序能自动处理接触问题，并在运行结果时，打印出钻头增斜力、增方位力、转角和各稳定器受力。

### 3. 参数研究和大、小挠度计算结果的比较

仍以第一节中的五种钻具为例，在特定条件下研究各参数对钻头与地层作用力的影响规律，并与小挠度计算结果对比。

#### (1) 钻压的影响(图2-24, 25, 26)

在斜直井中，降斜钻具Ⅲ的降斜力在大挠度分析中基本上不随钻压的变化而变化；然而在小挠度分析中，则随钻压增降斜力增加；用小挠度分析得到的降斜力较大挠度分析结果小。增斜钻具Ⅳ的增斜力在大挠度分析中基本上不随钻压的变化而变化，然而在

小挠度计算中，则随钻压的增加而略有增加。稳斜钻具Ⅴ在大小挠度分析中都显示出微小的增井斜力且随钻压的增加微增。三种钻具的方位力均可略去不计。

#### (2) 井斜角的影响(图2-27, 28, 29)

在斜直井中，降斜钻具Ⅲ的降斜力随井斜角的增大而增大，其中大挠度计算结果增长快且数值大。增斜钻具Ⅳ的增斜力随井斜角的增大而增加，其中小挠度分析结果数值大、增加快。稳斜钻具Ⅴ在小挠度分析中呈微增趋势，而在大挠度分析中显微降作用，三种钻具的方位力均很小。

#### (3) 井眼全角变化率的影响(图2-30, 31)

从图中可以看出随着井眼全角变化率的增加，钻头的增斜力减小，降斜力增加，且小挠度计算曲线变化幅度较大，体现了小挠度力学模型的刚度稍大，而大挠度力学模型的刚度较小；此外，两种模型得到的方位力基本一致。从数值上看，大挠度计算的增井斜力较小挠度计算结果小。

#### (4) 井眼主法线方向的影响(图2-32)

主法线方向对井斜力和方位力的影响规律在大小挠度力学分析中基本一致，不同的是用大挠度分析得到的增井斜力较用小挠度计算的增井斜力小一个数值。

#### (5) 导向钻具第一弯角的影响(图2-33)

随着第一弯角的增加，增井斜力以近似线性规律迅速增加。大小挠度分析结果相近。

### 四. 小结

总上所述，得出下部/导向钻具组合三维大挠度力学分析结论：

1. 本文建立的下部/导向钻具组合三维大挠度力学分析模型准确、合理。微分方程推导严格合理，未作任何小挠度处理，精确地表达了钻具变形与受力之间的微分关系。边界条件正确、合理。

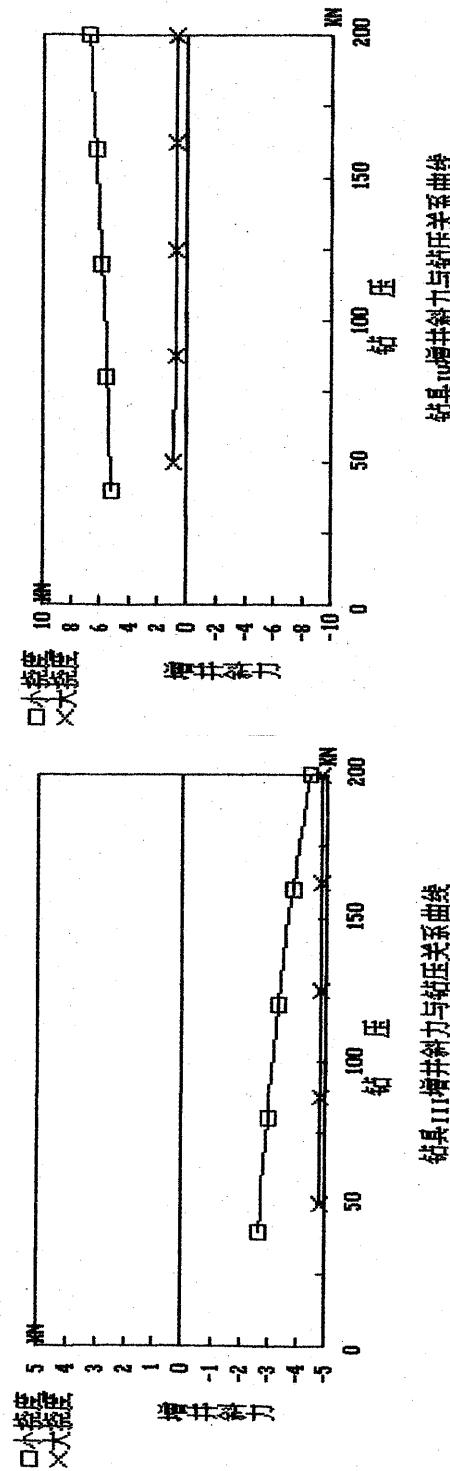
2. 应用加权余量法、加权目标函数和最优化方法分析下部/导向钻具组合的受力与变形，正确地处理切点处边界不完全确定的问题，解决了多元非线性常微分方程组和多元非线性方程组的求解问题，结果令人满意。

3. 利用下部/导向钻具组合三维大挠度力学分析理论，可以编制出通用的计算机程序。借助于微机，该程序能迅速计算各种下部/导向钻具组合的任意一点挠度、转角和内力，进而确定钻柱与井壁的接触点及接触力的大小，同时求得钻头的侧向力和钻头的转角。

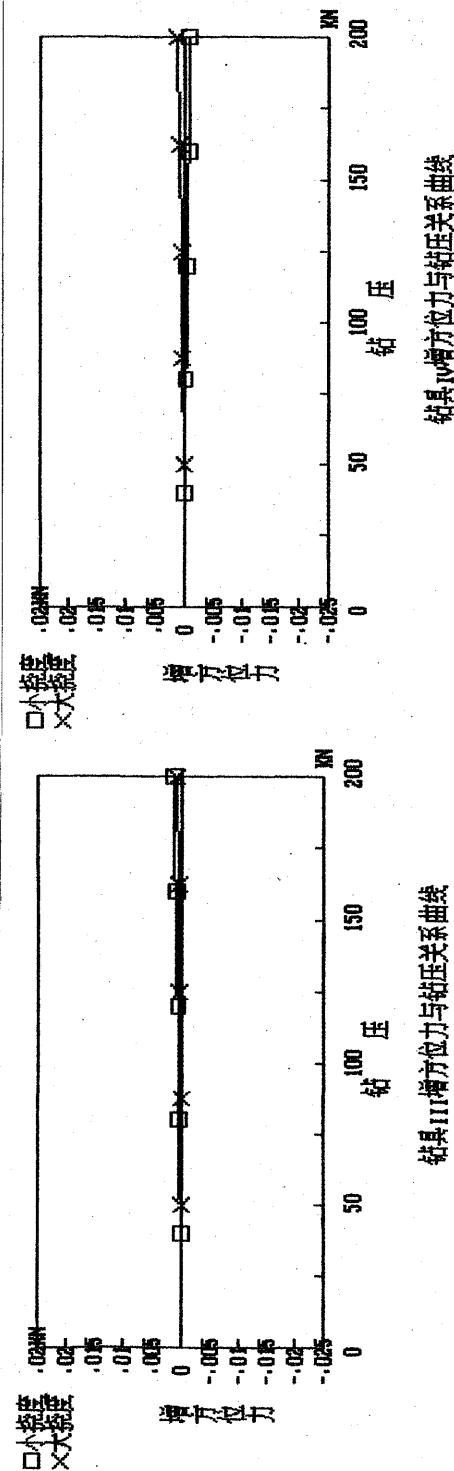
4. 各种参数对钻头侧向力和转角的影响趋势在大、小挠度力学分析中基本一致。

5. 下部/导向钻具组合的大挠度非线性效应在任何情况下都存在。井眼曲率对钻头侧向力影响在大挠度分析中较小挠度分析中稍小，显示出一定的柔性。一般情况下方位力在大、小挠度力学分析中基本一致，而增井斜力却存在一个差值——大挠度的增井斜力较小挠度的增井斜力小。

6. 下部/导向钻具组合大挠度分析程序计算量大、运行时间长。



钻具 III 增井斜力与钻压关系曲线



钻具 IV 增方位力与钻压关系曲线

图 2-24 钻具 III 增井斜力与钻压的关系  
(井斜角: 20°, 并眼曲率半径: 无穷大)

图 2-25 钻具 IV 钻头侧向力与钻压的关系  
(井斜角: 20°, 并眼曲率半径: 无穷大)

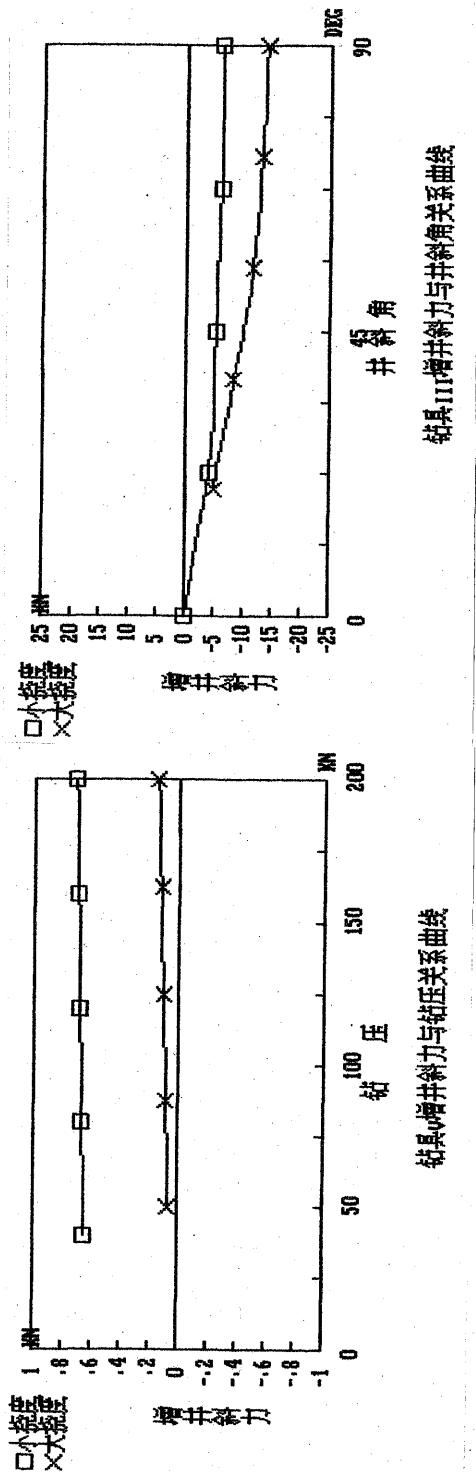


图 2-26 钻具 V 钻头侧向力与钻压的关系  
(井斜角:  $20^\circ$ , 并眼曲率半径: 无穷大)

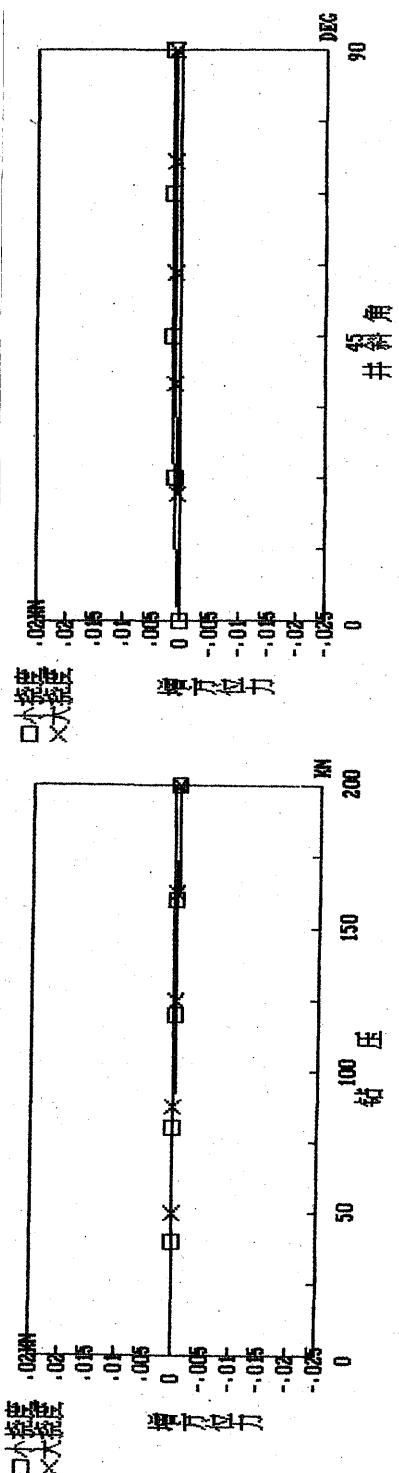


图 2-27 钻具 III 钻头侧向力与井斜角的关系  
(钻压: 150KN, 并眼曲率半径: 无穷大)

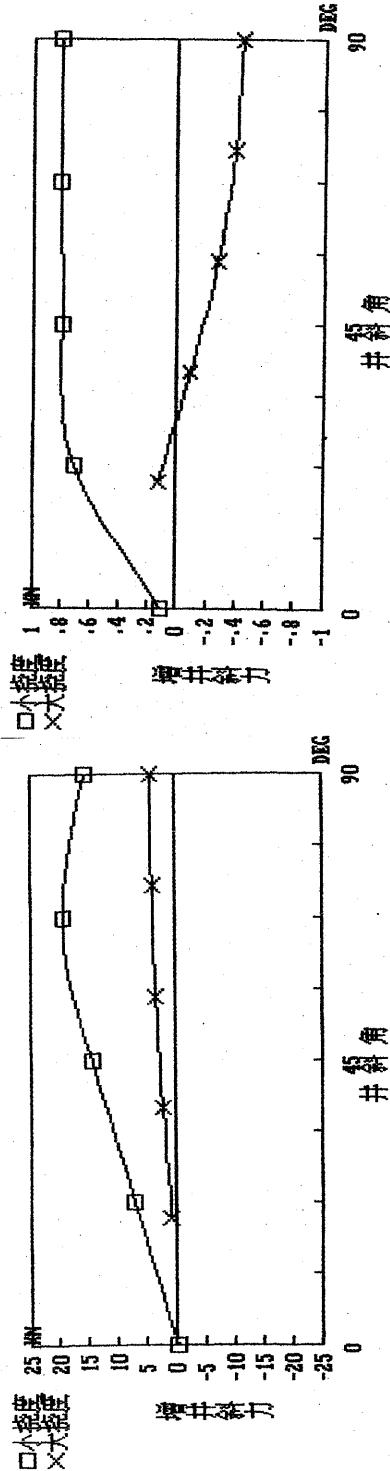
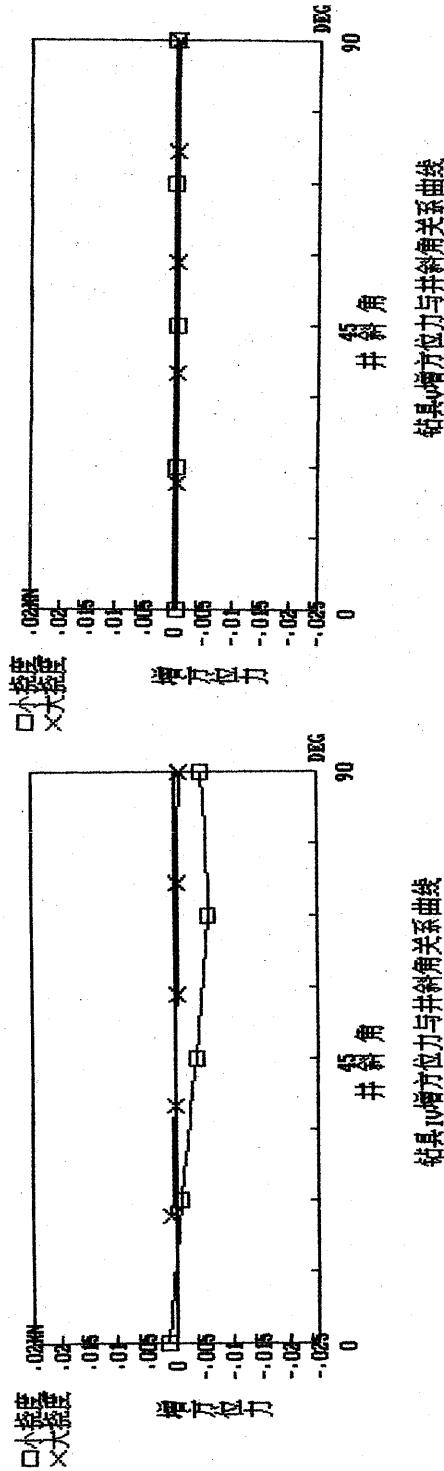
图 2-28 钻具 IV 钻头侧向力与井斜角的关系  
(钻压: 150KN, 并眼曲率半径: 无穷大)图 2-29 钻具 V 钻头侧向力与井斜角的关系  
(钻压: 150KN, 并眼曲率半径: 无穷大)

图 2-29 钻具 V 钻头侧向力与井斜角的关系  
(钻压: 150KN, 并眼曲率半径: 无穷大)

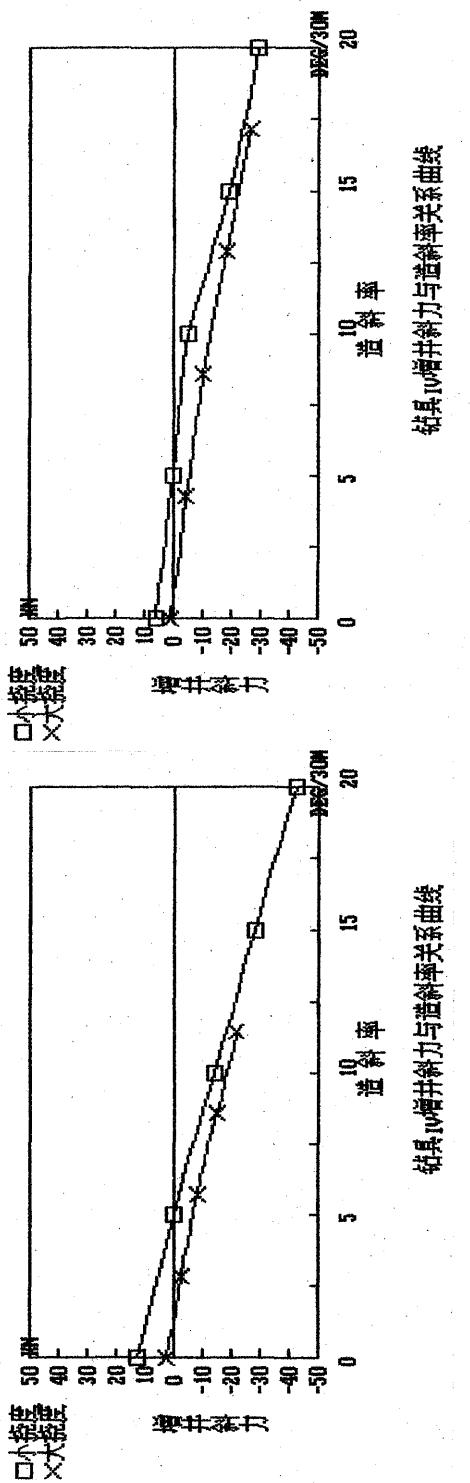


图 2-30 钻具 IV 钻头侧向力与造斜率的关系  
(钻压: 150kN, 主法线方向: 0° )

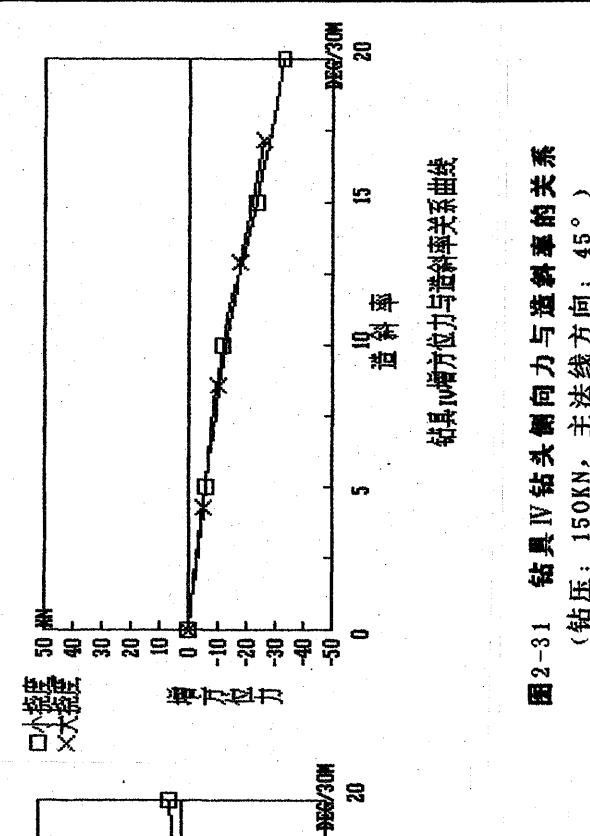
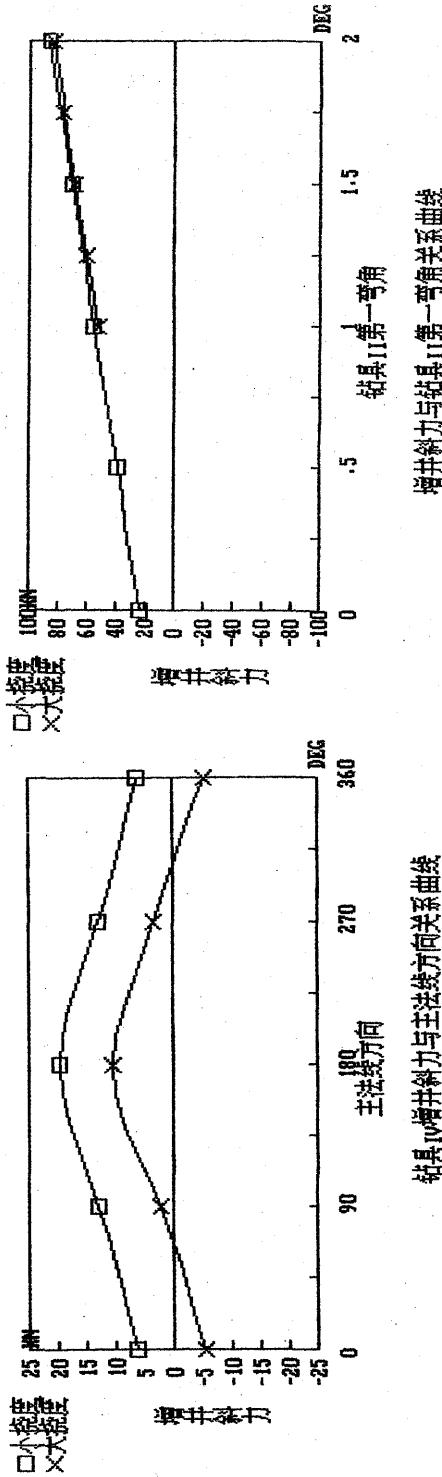
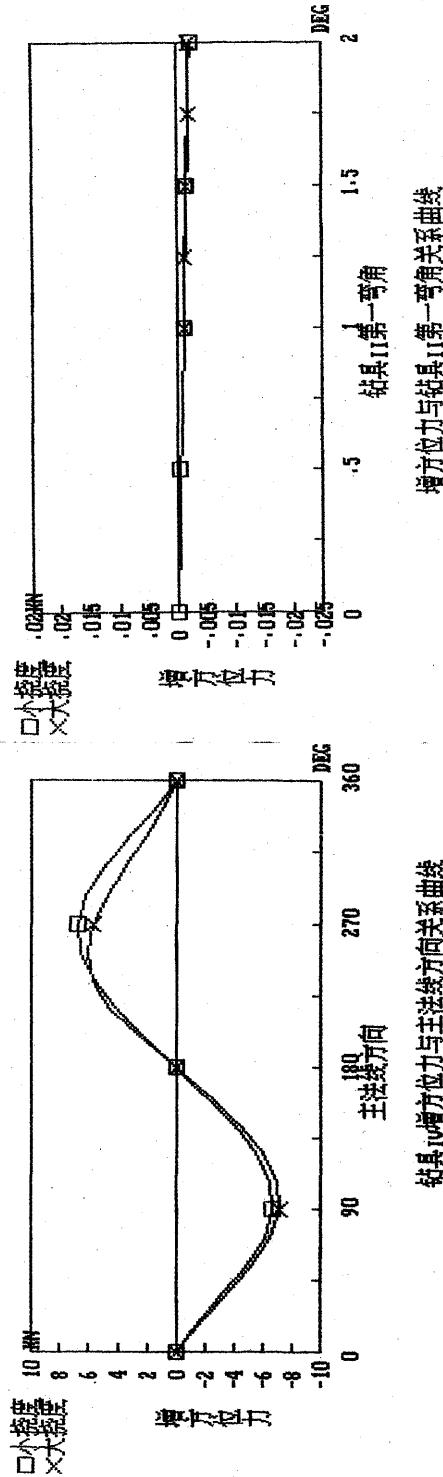


图 2-31 钻具 IV 钻头侧向力与造斜率的关系  
(钻压: 150kN, 主法线方向: 45° )



钻具 IV 增井斜力与主法线方向关系曲线

钻具 II 增井斜力与钻具 II 第一弯角关系曲线



钻具 II 增方位力与主法线方向关系曲线

增方位力与钻具 II 第一弯角关系曲线

图 2-32 钻具 IV 钻头侧向力与主法线方向的关系  
(钻压: 150KN, 并眼曲率半径: 400M,  
主法线方向: 180°, 装置角: 0°)

图 2-33 钻具 II 的钻头侧向力与第一弯角的关系  
(钻压: 150KN, 并眼曲率半径: 235M,  
主法线方向: 180°, 装置角: 0°)

## 第三章 钻头与地层相互作用

### 引言

人们在研究和实践中越来越清楚地认识到, 要解决好井眼轨迹预测和控制计算问题, 仅对下部钻具组合进行分析是不够的, 还必须进一步研究钻头和地层相互作用, 因为前者仅是后者的一个方面。钻井所遇到的地层一般均是沉积岩层, 其机械性质一般都具有明显的各向异性, 如岩石的强度、硬度及可钻性等都与方向密切相关。与此类似, 在钻井过程中, 井眼轨迹不仅取决于钻头与地层的作用力和作用方向, 而且必然与钻头和地层的各向异性钻井特性有很大关系。我们研究钻头与地层相互作用的主要目的, 就是寻找钻进方向与所钻地层、地层几何形状、钻头及地层的各向异性钻井特性及钻头和地层的作用力的合理关系, 以便更好地进行井眼轨迹预测和控制计算。

本章在前人研究的基础上, 在理论上进一步完善了钻头与地层相互作用模型, 并用矩阵的形式表达出来。同时建立了反演计算钻头各向异性、地层各向异性、地层可钻性、钻头轴向门限钻压和侧向门限钻压的数学方法。

### 第一节 地层各向异性和钻头各向异性的描述

#### 一. 地层各向异性

本文所研究的地层为典型的正交各向异性地层, 其物理和力学性质沿地层法向、倾向和走向互异。根据地质构造和电测方法可以了解地层的倾角及走向等几何形态, 若要确定地层的机械性质, 则需要进行岩石力学实验, 或利用井史资料反求。表达地层各向异性的方法很多, 如岩石可钻性方法、岩石研磨性方法、地球物理方法及力学中的本构关系等。本文将采用岩石可钻性方法。岩石可钻性方法的优点在于, 它既不受材料物性的限制, 又与钻头破岩直接关联, 便于研究和应用, 但它受破岩工具的类型、尺寸及其他破岩参数的影响。

地层各向异性, 可用岩石各向异性指数来表征。岩石各向异性指数可根据岩石可钻性概念来定义。假设钻头为各向同性, 所钻地层具有正交各向异性性质, 钻头沿地层倾向、走向和法向的钻速分别为 $R_{xf}$ 、 $R_{yf}$ 和 $R_{zf}$ , 相对应的作用力为 $F_{xf}$ 、 $F_{yf}$ 和 $F_{zf}$ , 门限钻压分别为 $MX_{xf}$ 、 $MX_{yf}$ 和 $MX_{zf}$ , 则沿三个方向的钻进效率可定义为:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{xf} = R_{xf} / (F_{xf} - MX_{xf}) \\ D_{yf} = R_{yf} / (F_{yf} - MX_{yf}) \\ D_{zf} = R_{zf} / (F_{zf} - MX_{zf}) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

正交各向异性地层的岩石可钻性异性指数有两个

$$\begin{cases} I_{xf} = D_{xf}/D_{zf} \\ I_{yf} = D_{yf}/D_{zf} \end{cases} \quad (3.2)$$

确定岩石可钻性各向异性指数的方法一般有两种：一种是利用井史资料反算；另一种则是取岩芯在室内测定。资料反算法简便实用，但会隐含其它因素的影响，其误差取决于使用的计算模型及井史资料的可靠性；室内微钻头试验，基本上克服了资料反算法的缺点，但又难免受到试验条件与钻井条件差别的影响。

## 二. 钻头各向异性

所谓钻头各向异性是指钻头本身结构在不同方向上钻进能力的差异。这是显而易见的。无论是牙轮钻头、刮刀钻头、金刚石钻头还是 PDC 钻头，其结构都是利于向前即沿轴线钻进的，因此，钻头沿轴线的钻进效率优于沿侧向的钻进效率，即存在钻进效率的各向异性。钻头各向异性可用钻头各向异性指数  $I_b$  来表示。假设各向异性钻头在各向同性地层里钻进，钻头的轴向作用力及钻速分别为  $F_a$  和  $R_a$ ，钻头的侧向作用力及钻速分别为  $F_i$  和  $R_i$ ，则可定义钻头各向异性指数如下：

$$I_b = \frac{R_i(F_a - MX_a)}{R_a(F_i - MX_i)} \quad (3.3)$$

其中， $MX_a$  为轴向门限钻压， $MX_i$  为侧向门限钻压。

不同类型、不同尺寸钻头的  $I_b$  值不同。即使同一钻头在钻不同岩石时， $I_b$  值也有变化。因此， $I_b$  是钻头类型、尺寸岩性等钻进参数的综合函数。

确定  $I_b$  的方法同样有两种，即井史反算和室内试验。

## 第二节 三维钻速方程

### 一. 参考坐标系的建立

在建立三维钻速方程时，要建立三个参考坐标系，即井眼轨迹坐标系、钻头轴线坐标系和地层坐标系。为讨论方便，取其共同的坐标原点为 0，即钻头处。

#### 1. 直角笛卡尔井眼轨迹坐标系 $Oxyz$

该坐标系就是导向钻具力学分析中建立的坐标系。 $z$  轴沿井眼轴线，指向钻柱上部； $x$  轴垂直于  $z$  轴，指向井眼低边； $y$  轴由右手法则确定。

#### 2. 直角笛卡尔钻头轴线坐标系 $OX_bY_bZ_b$

在该坐标系中， $Z_b$  轴沿钻柱变形后的切线方向指向钻柱上部； $X_b$  轴垂直于  $Z_b$  轴指向井眼低边； $Y_b$  轴按右手法则确定。

#### 3. 直角笛卡尔地层坐标系 $OX_rY_rZ_r$

在该坐标系中,  $Z_r$  轴沿地层法线方向指向上方;  $X_r$  轴沿地层倾向向下;  $Y_r$  与地层走向线重合, 并与  $Z_r$ 、 $X_r$  成右手关系。

## 二. 三维钻速方程

由于钻头各向异性和地层各向异性的影响, 导致钻头的钻进方向不与钻头机械合力方向一致。利用导向钻具力学分析程序, 可以计算钻头与地层之间的机械作用力以及钻头指向, 但要确定任一状态下钻头的钻进方向还必须计入地层和钻头各向异性等因素的影响, 建立一个合理的钻头与地层相互作用模型。

按地层各向异性和钻头各向异性的定义, 通过严格的力学和数学处理, 可以求得如下各向异性钻头与正交各向异性地层相互作用的三维钻速方程:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = D_a [F] \cdot [IF] \cdot [FB] \cdot [IB] \cdot [MX] \cdot [B] \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

其中

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{31} \\ f_{12} & f_{22} & f_{32} \\ f_{13} & f_{23} & f_{33} \end{bmatrix} \quad \text{为地层坐标系到井眼坐标系的坐标变换矩阵;}$$

$$[IF] = \begin{bmatrix} I_{xf} \\ I_{yf} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{为地层各向异性指数矩阵;}$$

$$[FB] = \begin{bmatrix} fb_{11} & fb_{12} & fb_{13} \\ fb_{21} & fb_{22} & fb_{23} \\ fb_{31} & fb_{32} & fb_{33} \end{bmatrix} \quad \text{为钻头轴线坐标系到地层坐标系的坐标变换矩阵;}$$

$$[IB] = \begin{bmatrix} I_b \\ I_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{为钻头各向异性指数矩阵}$$

$$[MX] = \begin{bmatrix} 1-\Delta i \\ 1-\Delta i \\ 1-\Delta a \end{bmatrix} \quad \text{为钻头的门限压力矩阵}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad \text{为井眼坐标系到钻头轴线坐标系的坐标变换矩阵。}$$

$$f_{11} = -\cos\alpha\cos\gamma\cos(\varphi-\beta) + \sin\alpha\sin\gamma$$

$$f_{12} = \cos\gamma\sin(\beta-\varphi)$$

$$f_{13} = -\sin\alpha\cos\gamma\cos(\varphi-\beta) - \cos\alpha\sin\gamma$$

$$f_{21} = -\cos\alpha\sin(\beta-\varphi)$$

$$f_{22} = -\cos(\varphi-\beta)$$

$$f_{23} = \sin\alpha \sin(\varphi-\beta)$$

$$f_{31} = -\sin\gamma\cos\alpha\cos(\beta-\varphi) - \cos\gamma\sin\alpha$$

$$f_{32} = \sin\gamma\sin(\beta-\varphi)$$

$$f_{33} = -\sin\gamma\sin\alpha\cos(\beta-\varphi) + \cos\gamma\cos\alpha$$

$$fb_{11} = -\cos(\alpha+\Theta_X)\cos\gamma\cos(\varphi-\Theta_Y-\beta) + \sin(\alpha+\Theta_X)\sin\gamma$$

$$fb_{12} = \cos\gamma\sin(\beta-\varphi+\Theta_Y)$$

$$fb_{13} = -\sin(\alpha+\Theta_X)\cos\gamma\cos(\varphi-\Theta_Y-\beta) - \cos(\alpha+\Theta_X)\sin\gamma$$

$$fb_{21} = \cos(\alpha+\Theta_X)\sin(\varphi-\Theta_Y-\beta)$$

$$fb_{22} = -\cos(\varphi-\Theta_Y-\beta)$$

$$fb_{23} = \sin(\alpha+\Theta_X) \sin(\varphi-\Theta_Y-\beta)$$

$$fb_{31} = -\sin\gamma\cos(\alpha+\Theta_X)\cos(\beta-\varphi+\Theta_Y) - \cos\gamma\sin(\alpha+\Theta_X)$$

$$fb_{32} = \sin\gamma \sin(\beta - \varphi + \Theta_y)$$

$$fb_{33} = -\sin\gamma \sin(\alpha + \Theta_x) \cos(\beta - \varphi + \Theta_y) + \cos\gamma \cos(\alpha + \Theta_x)$$

$$b_{11} = \cos\alpha \cos(\alpha + \Theta_x) \cos\Theta_y + \sin(\alpha + \Theta_x) \sin\alpha$$

$$b_{12} = \cos(\alpha + \Theta_x) \sin\Theta_y$$

$$b_{13} = \cos(\alpha + \Theta_x) \sin\alpha \cos\Theta_y - \sin(\alpha + \Theta_x) \cos\alpha$$

$$b_{21} = -\cos\alpha \sin\Theta_y$$

$$b_{22} = \cos\Theta_y$$

$$b_{23} = -\sin\alpha \sin\Theta_y$$

$$b_{31} = \cos\alpha \sin(\alpha + \Theta_x) \cos\Theta_y - \sin\alpha \cos(\alpha + \Theta_x)$$

$$b_{32} = \sin(\alpha + \Theta_x) \sin\Theta_y$$

$$b_{33} = \sin\alpha \sin(\alpha + \Theta_x) \cos\Theta_y + \cos\alpha \cos(\alpha + \Theta_x)$$

$$\Delta a = \begin{cases} MX_a/F_z & (F_z > MX_a) \\ 1 & (F_z \leq MX_a) \end{cases}$$

$$\Delta i = \begin{cases} MX_i/(F_x^2 + F_y^2)^{1/2} & (F_x^2 + F_y^2 > MX_i^2) \\ 1 & (F_x^2 + F_y^2 \leq MX_i^2) \end{cases}$$

$V_x, V_y, V_z$  —— 机械钻速在  $x, y, z$  方向的分量

$F_x, F_y, F_z$  —— 钻头机械力在  $x, y, z$  方向的分量

$\alpha$  —— 井斜角

$\phi$  —— 方位角

$\beta$  —— 地层下倾方位角

$\gamma$  —— 地层倾角

$\Theta_x$  —— 钻头偏向  $x$  轴的角

$\Theta_y$  —— 钻头偏向  $y$  轴的角

$D_a$  —— 轴向钻进效率

当门限压力为零，并令钻头轴线坐标与井眼轴线坐标一致时，该三维钻速方程就退化成 Jr. Cheatham 和 C.Y. Ho 于1981年发表的理论模型<sup>[28][29]</sup>在其它特殊条件下，可退化成其它模型。

### 第三节 三维钻速方程的反演模型

在第一节中曾经提到，钻头各向异性指数 $I_{\alpha}$ ，轴向和侧向门限钻压 $MX_{\alpha}$ 和 $MX_1$ ，轴向钻进效率 $D_a$ ，岩石各向异性指数 $I_{x,r}$ 和 $I_{y,r}$ ，可以通过室内测定或现场资料反演。从理论上讲，可以在室内建立综合试验装置，模拟井下条件，将上述六个参数较准确地测量出来并通过三维钻速方程用于钻井作业，然而，所钻地层岩石物理力学性质的局部性及钻井参数的多变性，使得该方法即不经济又不实用，只是在学术上起研究作用。一般来讲，现场资料反演法经济实用，在特定区域内可以较好地指导钻井实践。为此，选用该方法来确定地层及钻头的各向异性指数。

设某一特定钻具组合在某一均质各向异性地层里钻进，录取NF组工程数据。从理论上讲，每组工程数据都应满足三维钻速方程，但由于各种测量误差及模型误差的影响，可能不严格满足，为此令第i点的误差函数为

$$\begin{bmatrix} EX_i \\ EY_i \\ EZ_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \\ V_{zi} \end{bmatrix} - D_a [F_i] [IF] [FB_i] [IB] [MX] [B_i] \begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

其中  $EX_i, EY_i, EZ_i$  —— 第i点沿x, y, z方向的误差函数；

$V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}$  —— 第i点沿x, y, z方向的钻速；

$[F_i]$  —— 第i点地层坐标系到井眼坐标系的坐标变换矩阵；

$[FB_i]$  —— 第i点钻头轴线坐标系到地层坐标系的坐标变换矩阵；

$[IB]$  —— 第i点井眼坐标系到钻头轴线坐标系的坐标变换矩阵；

$F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}$  —— 钻头在x, y, z三个方向上对地层的作用力。

再令

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{3 \times (i-1)+1} = EX_i \\ E_{3 \times (i-1)+2} = EY_i \\ E_{3 \times i} = EZ_i \end{array} \right. \quad (3.6)$$

(  $i=1, 2, \dots, NF$  )

则可将该均质地层内的总误差函数表示为

$$E_0 = \sum_{j=1}^{3NF} E_j^2 \quad (3.7)$$

若 $NF=1$ 或/和在该井段以稳斜稳方位钻进，则(3.5)在该段仅能给出三个独立方程，方程(3.4)中的六个系数只能在三个已知的条件下，求解另外三个。

若 $NF \geq 2$ 并且以非稳斜稳方位钻进，则(3.5)能提供至少六个方程，其中有六个相互独立的方程，可求解方程(3.4)中的全部六个系数。若其中某些参数为已知，则独立方程的个数相应减少。下面就是确定全部六个系数的最优化目标函数：

$$\vec{x} = (D_a, I_{xf}, I_{yf}, I_b, Mx_a, Mx_i)^T \quad (3.8)$$

$$\vec{E} = (E_1, E_2, \dots, E_{3NF})^T \quad (3.9)$$

$$\min_{\vec{x}} (\vec{E}^T \cdot \vec{E}) \quad (3.10)$$

使(3.10)成立的系数，就是所求的地层各向异性指数和钻头各向异性指数等参数。

#### 第四节 小 结

通过本章的研究，得出如下主要结论：

1. 本文建立的三维钻速方程综合、全面、正确地表达了钻速矢量与地层机械力、钻头转角、钻头各向异性指数、地层各向异性指数、地层产状的数学关系。
2. 三维钻速方程必须与下部/导向钻具力学分析相结合。
3. 三维钻速方程既可用于预测和控制井眼轨迹，又可用于反求和评估钻头各向异性指数和地层各向异性指数，以及反求井眼轨迹失控的原因。
4. 三维钻速方程用矩阵形式表达，表达方便，物理意义简明。

## 第四章 井眼轨迹控制理论应用

### 引言

井眼轨迹控制技术是现代钻井技术中十分重要的组成部分。为了解决好井眼轨迹控制问题，一方面要研制专门的井下控制工具（硬件），另一方面还必须建立合理的理论控制模型，并编制有效的计算机程序（软件），本文的研究内容属于后者。

迄今为止，国内外用于井眼轨迹控制的常规方法主要有下列几种：<sup>[48]</sup>

- (1) 依据实践经验设计下部钻具组合和操作参数；
- (2) 以钻头侧向力为依据，定性评估下部钻具组合的钻井特性和预测井眼轨迹变化趋势；
- (3) 以钻头侧向力和地层力为综合依据，定性预测下部钻具组合的钻井特性；
- (4) 把钻头合力的作用方向作为钻进方向；
- (5) “平衡曲率法”——把使钻头侧向力等于零的井眼曲率作为下部钻具组合的造斜率；
- (6) 把钻头指向作为钻进方向；
- (7) 用钻头与地层相互作用模型确定钻进方向。

方法(1)纯属经验。方法(2)至方法(7)均需用下部/导向钻具力学分析程序。其中(2)、(4)和(5)均不考虑钻头异性和地层异性的影响；方法(3)以地层力的形式计入了地层因素的影响；方法(6)则意味着钻头只有轴向钻进能力。笔者认为(7)是比较合理的预测方法，其中关键是建立较精确的下部/导向钻具力学分析模型和钻头与地层相互作用模型，其次是应用技巧。

在本章里，笔者以前面的理论研究为基础，从井眼轨迹预测、实际需要出发，探讨井眼轨迹预测的新方法/技巧，研制出多功能微机程序，对它进行实钻资料检验和现场工程实验。

### 第一节 方法概述

造成钻头偏斜钻进的原因，一方面是由于下部/导向钻具组合产生的钻头侧向力和钻头偏转角，另一方面是由于地层及钻头各向异性的钻井效应。因此，可将影响钻头钻进方向的主要因素概括为如下五类：

- (1) 下部/导向钻具组合的结构参数和材料性质；
- (2) 钻头结构特性；
- (3) 钻井操作参数；
- (4) 实钻井眼的几何参数(井深、井斜角、方位角、井径)；
- (5) 地层特性。

其中，前三项是可以人为支配的主观因素，对应的参量称为可调参量；第(5)项是不可

人为改变的客观因素；第(4)项是钻前预测和控制的对象，在钻后可以通过实测获知。井眼几何形状的形成，既与主观因素有关，又与客观因素有关。同时，已形成的井眼又会产生反作用，它对下部钻具组合的受力与变形有较大的影响。因此，无论正演计算还是反演计算均可以三维钻速方程作为计算准则。

### 一、地层各向异性指数和钻头各向异性指数的确定

该项内容为三维钻速方程的反演计算。反演计算在钻后进行，已有实钻资料到手。从实钻资料中，我们可以提取导向钻具结构、操作参数、钻速及实钻井眼几何形状等数据，其正确性一方面取决于模型的合理性，另一方面取决于实钻资料的全面性和可靠准确性。

由于井眼轨迹仅在钻进参数改变、更换钻具和地层突然变化处产生拐点，而在用同一钻具以某一组确定的参数在均质地层里钻出的井眼轨迹是光滑的。根据坐标系的取法，在这些光滑点处的侧向钻速为零，即  $V_{x1} = V_{y1} = 0$ ，利用(3.5)至(3.10)式可以求出地层各向异性和钻头各向异性指数。

### 二、井眼轨迹的预测与控制

该项内容为三维钻速方程的正演计算，是为了预测钻头的钻进轨迹和钻速。若进行预测计算，则主观条件和客观条件均为已知，求解的问题是：在这种条件下，钻头将以多大的钻速钻出什么样的井眼；若进行控制计算，则井眼几何形状是预先规定好的，客观因素也已知，求解的问题是：采取怎样的主观措施（包括合理选择导向钻具结构、钻头类型及操作参数）才能钻成规定的井眼。要进行有效的预测和控制计算，除了建立正确的理论模型以外，还必须选择合理的计算方法。

若将钻头的瞬时钻进方向直接作为下一计算点的井眼轨迹方向，则存在如下问题：(1) 钻头的瞬时钻进方向是不断变化的，一般不会在某一井段内保持为常数；(2) 两计算点的距离选得是否得当直接影响计算结果的准确性，距离太长则计算的井眼曲率小于实际井眼曲率，若距离太短则会使计算的井眼轨迹产生锯齿状波动，并逐渐放大。为此，必须在利用三维钻速方程时采用一些技巧。

从井眼形成过程来看，除个别拐点外，井眼是光滑的，按坐标系取法、横向钻速为零。为此，在井眼轨迹预测中应尽量使钻头的横向钻速为零。

设某预测点的井深为  $d_m$ ，井斜角为  $\alpha_m$ ，方位角为  $\phi_m$ ，则它们应满足

$$V_x^2(d_m, \alpha_m, \phi_m) + V_y^2(d_m, \alpha_m, \phi_m) = 0 \quad (4.1)$$

上式即为井眼轨迹预测方程，为了减小误差，两预测点间的距离不能取得过长。

## 第二节 微机程序

基于上述方法，本文以导向钻具组合受力分析为重点，以三维钻速方程为核心，从现场实际情况和定向水平井眼轨迹的实际需要出发，研制了综合计算机程序，可以在

IBM 微机上使用。

该程序的主要功能包括：

- (1)评估地层的可钻性、地层各向异性；钻头各向异性及轴向、侧向限钻压；
- (2)定量预测三维井眼轨迹及钻速。

该程序的扩展功能有：

- (3)优选钻具结构；
- (4)控制钻压。

### 一. 地层各向异性、钻头各向异性、及钻进效率的评估

对于拟打定向水平井的油田，根据地质部门提供的地质资料，可以粗略地了解井位下面地层的岩性、地层倾角及倾向等几何产状，但不能了解地层的可钻性和各向异性。另外，也不能在实验室里做各种岩石的可钻性试验和各向异性试验来确定所有地层的参数。因此，利用已有的实钻资料对地层的可钻性、各向异性及钻头的各向异性等参数进行正确的评估是十分必要的。该程序的第一功能便适应了这种需要。利用评估结果，可以比较确切地认识钻头及地层因素对井眼轨迹的影响规律，从而对待钻井实行更有效地预测和控制。

### 二. 井眼轨迹和钻速的预测及钻后分析

该功能是建立在导向钻具组合大小挠度力学分析、三维钻速方程和井眼侧向钻速接近于零的基础上的。它能预测出井斜角和方位角随井深的变化规律，进而对导向钻具组合进行优化或优选，合理地控制钻压。这样既有效地控制了井眼轨迹，又降低了钻井成本。

对于已钻的井，利用该预测程序进行钻后分析，可以总结出成功的经验和失败的教训，有利于今后钻井效率的提高。

## 第三节 应用实例

### 一. 钻头各向异性指数和地层各向异性指数的反演计算

根据NMH-1水平井的地质和实钻资料，应用上述计算程序对钻头与地层各向异性指数进行计算。根据油层顶面构造图，得到该面地层倾角 $18^{\circ}$ 下倾方位角 $80^{\circ}$ ；由于上部资料缺乏，近似认为下倾方位角不变，而地层倾角由油层的 $18^{\circ}$ 线性递减至地面 $0^{\circ}$ 。在进行钻柱受力分析时，均采用实际井眼轨迹和实际钻压、转速等参数。计算结果：钻头各向异性指数 $0.01\sim0.5$ ，地层（横观各向同性）各向异性指数 $0.95\sim1.05$ 。

### 二. 井眼轨迹预测和计算

根据“八五”国家重点科技项目：水平钻井技术攻关的需要，我们在 NMH-1 井现场对下部/导向钻具的造斜率进行了钻前预测，钻后用综合微机程序计算了该井的井眼

轨迹。

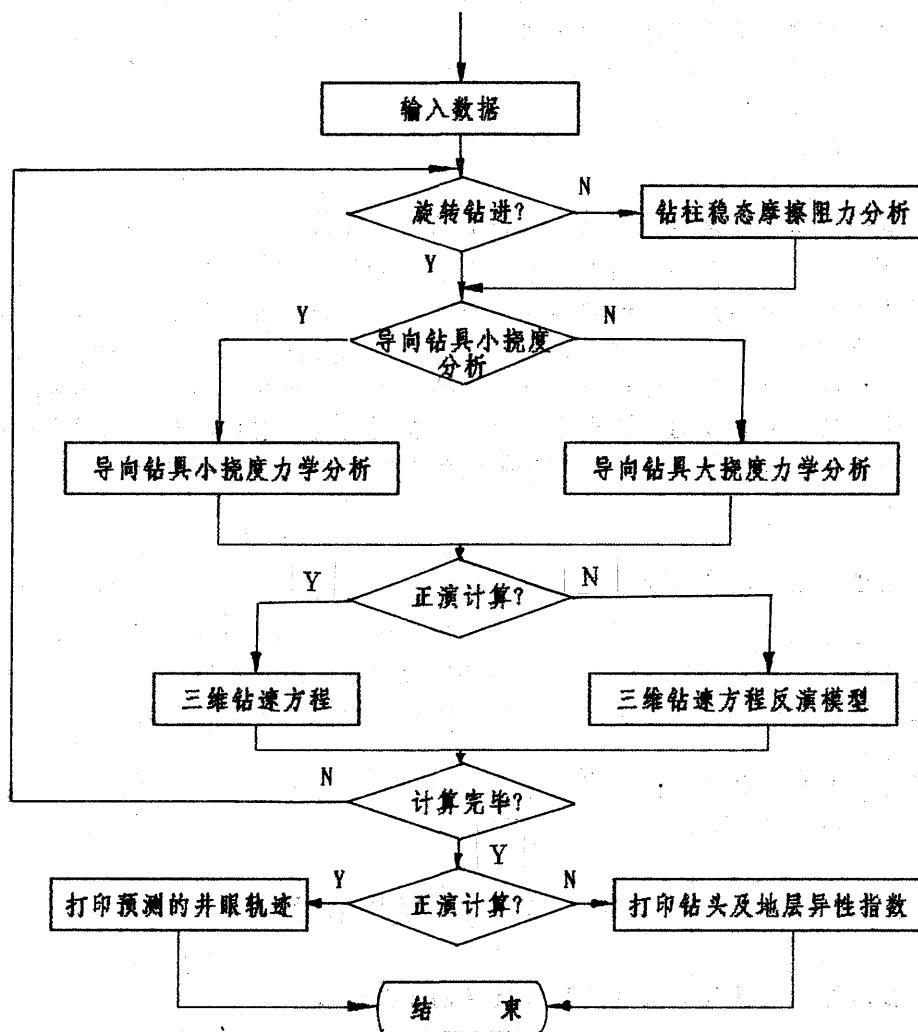


图 4-1 综合微机程序框图

### 1. 计算的井眼轨迹

根据附录E 中NMH-1井的钻具组合和预测井段上方的井眼轨迹，在地层各向同性、估计钻头各向异性指数和扶正器向下偏心距的条件下，用本文的综合微机程序对该井的井眼轨迹进行了分段计算，见表 4-1至表 4-6。将计算的井眼轨迹与实测的井眼轨迹（表E-3）对比可以发现：

表 4-1 计算井眼轨迹 (2541~2601M)

最深测斜数据:	测深2541米	井斜角 7.8度	方位角199度
钻头各向异性指数:	.3		
地层各向异性指数:	1		
稳定器向下偏心距:	3mm		
测深(米) 井斜角(度) 方位角(度)	测深(米) 井斜角(度) 方位角(度)		
2551 9.0713 196.518	2581 10.6267 205.7		
2561 10.478 194.641	2591 10.5357 219.72		
2571 10.7178 204.061	2601 10.66 237.4		

表 4-2 计算井眼轨迹 (2610~2755M)

最深测斜数据:	测深2610米	井斜角 12.25度	方位角215度
钻头各向异性指数:	.3		
地层各向异性指数:	1		
稳定器向下偏心距:	2601~2670M 14mm; 2670~2710 10mm; 2722~2755 12mm		
测深(米) 井斜角(度) 方位角(度)	测深(米) 井斜角(度) 方位角(度)		
2620 13.02 215.4	2690 18.3 215.3		
2630 13.65 215.5	2700 19.67 215.3		
2640 14.10 215.4	2710 21.04 215.3		
2650 14.77 215.4	2720 21.56 222.2		
2660 15.43 215.4	2730 22.10 221.8		
2670 16.13 215.4	2740 22.80 223.8		
2680 17.11 215.3	2750 23.40 223.9		

表4-3 计算井眼轨迹(2775~3105M)

最深测斜数据:	测深2775米	井斜角 25度	方位角 235.5度		
钻头各向异性指數:	.3				
各地层各向异性指數:	1				
稳定器下偏心距:	2755~2952M, 3058~3105 12mm; 3019~3058 8mm				
测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)	测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
2780	25.47	235.3	2950	41.59	236.3
2790	26.26	235.8	2960	41.84	233.4
2800	26.88	236.1	2970	42.40	232.3
2810	27.50	236.2	2980	42.40	229.8
2820	28.13	236.3	2990	42.40	225.8
2830	28.95	236.3	3000	42.94	224.8
2840	29.81	236.3	3010	42.90	222.6
2850	30.68	236.3	3020	45.03	224.1
2860	31.56	236.3	3030	43.29	222.2
2870	32.45	236.3	3040	42.40	222.3
2880	33.34	236.3	3050	41.54	222.3
2890	34.23	236.3	3060	40.64	222.3
2900	35.38	236.3	3070	41.30	222.3
2910	36.61	236.3	3080	42.44	222.3
2920	37.84	236.3	3090	43.47	222.3
2930	39.08	236.3	3100	44.47	222.3
2940	40.32	236.3	3105	44.97	222.3

表4-4 计算井眼轨迹(3104~3349M回填段)

最深测斜数据:	测深3104米	井斜角 47.5度	方位角 235.4度		
钻头各向异性指數:	.3				
各地层各向异性指數:	1				
稳定器下偏心距:	3105~3119M, 3153~3175M, 3193~3349M 12mm 3119~3153M 8mm; 3173~3193M 14mm				
测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)	测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
3114	48.54	235.1	3234	57.93	235.1
3124	49.58	235.1	3244	58.95	235.1
3134	49.95	235.1	3254	59.98	235.1
3144	50.50	235.1	3264	61.02	235.1
3154	49.87	235.1	3274	62.06	235.1
3164	50.43	235.1	3284	63.11	235.1
3174	51.47	235.1	3294	64.16	235.1
3184	52.64	235.1	3304	64.3	235.1
3194	53.84	235.1	3314	63.98	235.1
3204	54.89	235.1	3324	63.48	235.1
3214	55.90	235.1	3334	62.90	235.1
3224	56.91	235.1	3344	62.3	235.1

表4-5 计算井眼轨迹(3104~3379M)

最深测斜数据:	测深3104米	井斜角 47.5度	方位角 235度		
头各向异性指数据:	.3				
地各向异性指数据:	1				
稳器下偏心距:	导向钻具 4mm, 增斜钻具 6mm				
测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)	测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
3114	49.51	232.7	3254	77.60	222.5
3124	51.65	230.1	3264	72.8	222.6
3134	53.80	227.6	3274	72.64	222.6
3144	55.95	225.2	3284	73.45	222.6
3154	57.80	224.3	3294	74.73	222.6
3164	58.96	224.2	3304	77.20	223.2
3174	61.65	224.3	3314	80.02	224.0
3184	64.53	224.3	3324	82.19	224.4
3194	67.40	224.3	3334	81.90	224.5
3204	69.22	224.3	3344	82.6	224.5
3214	69.88	224.3	3354	84.3	224.2
3224	71.85	223.8	3364	87.05	223.5
3234	74.06	223.2	3374	87.7	223.5
3244	76.27	222.6	3379	87.75	223.4

表4-6 计算井眼轨迹(3393~3623M)

最深测斜数据:	测深3393米	井斜角 90度	方位角 223.5度		
头各向异性指数据:	.3				
地各向异性指数据:	1				
稳器下偏心距:	7~8mm				
测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)	测深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
3398	80.36	223.5	3513	88.11	223.5
3403	90.71	223.5	3523	87.74	223.5
3413	90.84	223.5	3533	87.36	223.5
3423	91.02	223.5	3543	86.99	223.5
3433	91.21	223.5	3553	87.27	223.5
3443	90.95	223.5	3563	87.64	223.5
3453	90.55	223.5	3573	87.88	223.5
3463	90.14	223.5	3583	88.08	223.5
3473	89.73	223.5	3593	88.29	223.5
3483	89.31	223.5	3603	88.02	223.5
3493	89.00	223.5	3613	87.65	223.5
3503	88.48	223.5	3623	87.28	223.5

- (1) 计算的井斜角与实测的井斜角相当接近, 误差小于 $1^\circ / 100M$ 。  
 (2) 在大斜度井段和水平井段, 计算的方位角与实测的方位角相当接近, 误差小于 $1^\circ / 100M$ ; 而在小斜度井段则误差较大。

## 2. 下部/导向钻具造斜率的预测

由于条件的限制, 我们在现场用导向钻具小挠度力学分析程序和平衡曲率法仅预测了四趟钻具的造斜率(见表4-7)。从表中看出, 预测造斜率与实测造斜率相当一致。

表4-7 下部/导向钻具造斜率预测

井段(M)	钻具类型	预测造斜率	实际造斜率	绝对误差
3158~3197	导向钻具	9度/30M	9度/30M	0
3197~3213	增斜钻具	3度/30M	2.5度/30M	.5度/30M
3213~3241	加长导向钻具	6.3度/30M	6度/30M	.3度/30M
3274~3291	增斜钻具	0.6度/30M	0.7度/30M	.1度/30M

## 第四节 小 结

通过上述研究, 得到如下结论和认识:

1. 本章提出的以井眼轨迹连续光滑为目标, 将下部导向钻具大小挠度力学分析与三维钻速方程相结合建立的井眼轨迹预测方程既可以计算井斜角的变化又可以计算方位角的变化, 较其它井眼轨迹预测方法具有明显的理论上的先进性和实际应用上的可靠、准确性, 并得到了初步验证, 可以试推广使用。
2. 以井眼轨迹光滑为条件, 将下部/导向钻具大小挠度力学分析与三维钻速方程相结合建立的三维钻速方程的反演模型, 在理论上可以计算钻头的各向异性指数、地层的各向异性指数、地层的可钻性、钻头的轴向和侧向限钻压共计六个参数, 较其它反演模型在理论上更趋与完善。
3. 定向水平井轨迹控制与参数反演多功能微机程序具有模型先进、操作简便的优点, 并得到了实际数据的初步验证, 可以试推广使用。
4. 准确可靠的实钻资料对于正确地评估钻头和地层的各向异性是非常重要的; 准确可靠的井下和地质数据对于准确地预测井眼轨迹是必不可少的。
5. 目前的理论和程序还未完全解决钻柱与井壁的空间接触状态问题, 还需进一步研究。
6. 应注重稳定器扩眼作用的研究和井眼形成初期井径的测量和研究工作。
7. 导向钻具造斜率范围大、稳定、易于控制和计算, 应尽快推广到普通定向井和丛式井钻井作业中。

## 第五章 结 论

综合上述四章的研究结果, 将主要结论归纳如下:

1. 本文建立的稳态钻柱拉力-扭矩模型综合考虑了钻柱构成、井眼环境和作业过程及参数三大类因素, 适用于一切钻井过程中钻柱受力计算。根据该模型编制的多功能计算机软件可以确定钻柱与井壁的摩擦系数、预测和计算钻柱的受力状态、计算井下动力钻进的实际钻压、优选井眼剖面、校核钻柱的强度和稳定性、预测水平井段最大可钻长度等。
2. NMH-1水平井上提摩擦系数在 0.182~0.3 之间; 下放摩擦系数在 0.14~0.252 范围内。
3. 本文建立的下部/导向钻具组合三维小挠度力学分析模型比较准确地反映了钻具在井下的受力状态, 是目前较先进的小挠度力学分析数学模型。应用相邻函数定理可以很方便地处理导向钻具的弯角和装置角。
4. 本文建立的下部导/向钻具组合三维大挠度力学分析模型正确。微分方程推导严格合理, 未做任何小挠度处理, 精确地表达了挠度与受力之间的微分关系。边界条件正确、合理。
5. 应用加权余量法、加权目标函数和最优化方法分析下部导向/钻具组合的受力和变形, 可以正确地处理切点处约束条件不完全确定的问题、圆满地解决多元非线性微分方程组和多元非线性方程组的求解问题, 效果很好。
6. 分别应用下部导/向钻具组合三维大、小挠度力学分析模型编制的下部导向钻具组合三维大、小挠度力学分析软件, 都可以计算下部导向钻具组合任意一点的挠度、受力和转角, 进而确定钻柱与井壁的接触点及接触力的大小, 同时求得钻头与地层的作用力和钻头的转角。
7. 钻压对下部/导向钻具组合的钻头侧向力有些影响, 但不太显著。
8. 井眼的空间几何形状对下部/导向钻具组合的钻头侧向力和钻头转角影响较大, 应给予充分重视。
9. 离钻头越近的稳定器对钻头侧向力和钻头转角影响越大, 越远越小。通过调节稳定器的数量和位置, 可以在一定范围内控制井眼轨迹。
10. 导向钻具的弯角、装置角及其位置对钻头侧向力和钻头转角影响很大。通过调节这几个参数, 可以有效地控制井眼轨迹。
11. 各种参数对钻头侧向力和钻头转角影响趋势在大小挠度力学分析中基本一致。
12. 下部导向/钻具组合的大挠度非线性效应在任何情况下都存在。井眼曲率对钻头侧向力的影响在大挠度力学分析中较小挠度分析中稍小, 显示出一定的柔性。一般情况下方位力在大、小挠度力学分析中基本一致, 而增井斜力却存在一个的差值——大挠度分析的增井斜力较小挠度分析的增井斜力小。

13. 本文改进并以矩阵形式给出的三维钻速方程综合、全面、正确地表达了钻速矢量与钻头机械力、钻头转角、钻头各向异性指数、地层各向异性指数和地层产状的数学关系。

14. 三维钻速方程既可用于预测和控制井眼轨迹，又可以反求和评估地层各向异性指数和钻头各向异性指数等参数，以及分析井眼轨迹失控的原因。

15. 本文以井眼轨迹光滑为目标，将下部/导向钻具组合三维大、小挠度力学分析与三维钻速方程相结合建立的井眼轨迹预测方程既可以计算井斜角的变化，又可以计算方位角的变化，较其它轨迹预测方法具有明显的理论上的先进性和实际应用上的可靠准确性，并得到了初步验证，可以试推广使用。

16. 以井眼轨迹光滑为条件，将下部/导向钻具组合三维大、小挠度力学分析与三维钻速方程相结合建立的三维钻速方程的反演模型在理论上可以计算钻头各向异性指数、地层沿走向、倾向的各向异性指数、地层的可钻性、钻头的轴向和侧向门限压力共计六个参数。

17. 准确可靠的实钻资料对于正确地评估钻头和地层的各向异性指数是非常重要的；准确可靠的井下和地质数据对于准确地预测井眼轨迹是必不可少的。

18. 导向钻具造斜率范围大、稳定、易于控制和计算，应尽快推广到普通定向井和丛式井钻井作业中。

从文献上看，本文对钻井理论的发展和创新如下：

1. 本文所建的稳态钻柱拉力扭矩模型不但考虑了钻柱的内力、浮重、刚度、井斜角、方位角、摩擦系数，而且正确地计入了钻柱的运动状态和钻井液的粘滞力、结构力的影响，从根本上消除了谬误，还得到了实际验证，是同类模型中较完善、较先进的。

2. 正确地给出了下部/导向钻具大小挠度力学分析在钻头处和切点处的边界条件。

3. 用相邻函数定理处理了导向钻具三维小挠度力学分析中导向钻具的弯角和装置角。

4. 本文建立的下部/导向钻具组合三维大挠度力学分析模型是同类模型中较完善的、唯一未作任何小变形处理的真正的大挠度分析模型。

5. 应用加权余量法、加权目标函数和最优化方法解决了切点处边界条件不完确定的问题，并给出了下部/导向钻具组合三维大小挠度力学分析解答。

6. 本文改进的钻头与地层相互作用模型较其它同类模型在理论上更趋完善。

7. 本文提出的井眼轨迹预测方程在理论上更趋合理、在应用上更符合实际。

## 附录 A 符号注释

本文采用国际单位制, 各符号的物理意义如下:

- (N, E, D) —— 直角大地坐标系, N 轴向北, E 轴向东, D 轴向下。
- (x, y, z) —— 井眼随动坐标系, 其中 z 轴与钻头处的井眼上方向一致, x 轴垂直 z 轴指向井眼低边, y 轴由右手法则确定。
- (X<sub>b</sub>, Y<sub>b</sub>, Z<sub>b</sub>) —— 钻头随动坐标系, Z<sub>b</sub> 轴沿钻柱变形后的切线指向上方, X<sub>b</sub> 轴垂直 Z<sub>b</sub> 轴指向钻柱低边, Y<sub>b</sub> 由右手法则确定。
- (X<sub>r</sub>, Y<sub>r</sub>, Z<sub>r</sub>) —— 直角地层坐标系, Z<sub>r</sub> 沿地层法线指向上方, X<sub>r</sub> 沿地层倾向向下, Y<sub>r</sub> 沿地层走向与 Z<sub>r</sub>、X<sub>r</sub> 成右手关系。
- (t, n, b) —— 直角伴随三棱形, t 沿井眼切线向上, n 为井眼主法线方向, b 为井眼副法线方向。
- (D<sub>xr</sub>, D<sub>yr</sub>, D<sub>zr</sub>) —— 钻头沿地层倾向、走向、法向的钻进效率
- (F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>, F<sub>z</sub>) —— 钻头与地层的作用力在 x, y, z 方向的分量
- (F<sub>xr</sub>, F<sub>yr</sub>, F<sub>zr</sub>) —— 钻头沿地层倾向、走向、法向的钻压
- (MX<sub>xr</sub>, MX<sub>yr</sub>, MX<sub>zr</sub>) —— 钻头沿地层倾向、走向、法向的门限压力
- (R<sub>xr</sub>, R<sub>yr</sub>, R<sub>zr</sub>) —— 钻头沿地层倾向、走向、法向的钻速
- (T<sub>x</sub>, T<sub>y</sub>, T<sub>z</sub>) —— 钻柱内力在 x, y, z 方向的分量
- (V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub>) —— 钻速在 x, y, z 方向的分量
- (U, V, W) —— 钻柱轴线坐标
- (X, Y, Z) —— 井眼中心坐标
- A —— 钻柱截面积
- A<sub>q</sub> —— 安全系数
- A<sub>eq</sub> —— 最小安全系数
- a —— 试函数系数
- b —— 试函数系数
- CK —— 加权系数
- D<sub>a</sub> —— 轴向钻进速度
- D<sub>w</sub> —— 井眼直径
- D<sub>o</sub> —— 钻柱外径
- E —— 钻柱材料的弹性模量
- EC —— 钻柱与井眼的偏心距
- e —— 单位长度钻柱的摩擦扭矩
- $\bar{E}$  —— 误差函数列向量
- E<sub>0</sub> —— 总误差函数
- F —— 钻柱内力矢量
- F<sub>a</sub> —— 轴向压力

- $F_b$  —— 增斜力  
 $F_{or}$  —— 钻柱失稳载荷  
 $F_t$  —— 側向压力  
 $F_w$  —— 增方位力  
 $f$  —— 钻柱与井壁的摩擦系数  
 $\bar{f}$  —— 单位长度钻柱表面力矢量  
 $G$  —— 钻柱材料剪切弹性模量  
 $H$  —— 单位长度钻柱体积力矢量  
 $I$  —— 钻柱抗弯截面模量  
 $I_b$  —— 钻头异性指数  
 $I_{xr}$  —— 地层倾向可钻异性指数  
 $I_{yr}$  —— 地层走向可钻异性指数  
 $J$  —— 钻柱抗扭截面模量  
 $\bar{k}$  —— 重力方向单位向量  
 $K_b$  —— 井眼的曲率  
 $K_n$  —— 井眼的挠率  
 $L$  —— 某段钻柱长度  
 $l$  —— 钻柱长度坐标  
 $M$  —— 钻柱内力矩矢量  
 $M_b$  —— 钻柱弯矩  
 $M_t$  —— 钻柱扭矩  
 $M_{X_a}$  —— 轴向门限压力  
 $M_{X_t}$  —— 側向门限压力  
 $M_o$  —— 钻井液在单位长度钻柱上的扭矩  
 $N$  —— 钻柱与井壁的接触压力  
 $N_b$  —— 钻柱与井壁的接触压力在 b 方向分量  
 $N_n$  —— 钻柱与井壁的接触压力在 n 方向分量  
 $n$  —— 钻柱段数或有效绳数  
 $p$  —— 单位长度钻柱的浮重  
 $r$  —— 钻柱半径  
 $R_a$  —— 轴向钻速  
 $R_t$  —— 側向钻速  
 $R_X$  —— 井壁支撑力在 x 方向分量  
 $R_Y$  —— 井壁支撑力在 y 方向分量  
 $S_x$  —— 某段钻柱下端 x 方向分力  
 $S_y$  —— 某段钻柱下端 y 方向分力  
 $T$  —— 同  $M_t$   
 $TOB$  —— 钻头扭矩  
 $TOR$  —— 转盘扭矩

- $T_t$  —— 钻柱轴向拉力  
 $V$  —— 起下钻速度  
 $WB$  —— 该段钻柱下端的轴向压力  
 $WOB$  —— 钻压  
 $WOG$  —— 指重表读数  
 $WOH$  —— 大钩负荷  
 $xsh$  —— 试函数项数  
 $\bar{x}$  —— 自变量列向量  
 $[B]$  —— 井眼随动坐标系到钻头随动坐标系转换矩阵  
 $[C]$  —— 常数列向量  
 $[DX]$  —— 自变量列向量  
 $[F]$  —— 地层坐标系到井眼随动坐标系转换矩阵  
 $(FB)$  —— 钻头随动坐标系到地层坐标系转换矩阵  
 $(IB)$  —— 钻头异性矩阵  
 $(IF)$  —— 地层异性矩阵  
 $(M)$  —— 系数矩阵  
 $(MX)$  —— 门限压力矩阵  
 $\alpha$  —— 井斜角  
 $\phi$  —— 方位角  
 $\gamma$  —— 钻柱扭转角  
 $\theta$  —— 导向钻具弯角  
 $\omega$  —— 导向钻具弯角装置角  
 $\delta$  —— 稳器偏斜角  
 $\gamma$  —— 地层倾角  
 $\beta$  —— 地层下倾方位角  
 $\Theta_x$  —— 钻头偏向x轴的夹角  
 $\Theta_y$  —— 钻头偏向y轴的夹角  
 $\omega_o$  —— 钻柱圆频率  
 $\tau_o$  —— 钻井液的结构力  
 $\mu$  —— 钻井液的动力粘度  
 $\eta$  —— 单个滑轮的传递效率  
 $\sigma_s$  —— 材料屈服强度  
 $\sigma_t$  —— 钻柱轴向应力  
 $\tau$  —— 钻柱剪应力

## 附录 B

## 井眼轨迹的微分几何量 [68] [69] [71]

## 一. 坐标系的建立

最方便计算和立体感最直观的坐标系是空间笛卡尔直角坐标系, 而钻井工程上的测量则是以井口为起点的空间曲线坐标系进行的, 为此需建立这两种坐标系。

## 1. 地球坐标系 O'NED

取井口为坐标原点, N 轴指向正北, E 轴指向正东, D 轴指向正下方, 沿三个方向的单位矢量分别为  $\vec{I}$ ,  $\vec{J}$  和  $\vec{K}$ 。

2. 曲线坐标系 O'S $\alpha\phi$ 

取井口为曲线的起点, S 处的井斜角为  $\alpha$ , 方位角为  $\phi$ 。

## 3. 两坐标系之间的关系

地球坐标系的坐标 (N, E, D) 和空间曲线坐标 (S,  $\alpha$ ,  $\phi$ ) 的关系如下:

$$N = \int_0^S \sin\alpha \cos\phi \, ds \quad (B.1)$$

$$E = \int_0^S \sin\alpha \sin\phi \, ds \quad (B.2)$$

$$D = \int_0^S \cos\alpha \, ds \quad (B.3)$$

若将井眼轨迹用 R 表示, 则有

$$\begin{aligned} \bar{R} &= N \vec{I} + E \vec{J} + D \vec{K} \\ &= \int_0^S \sin\alpha \cos\phi \, ds \vec{I} + \int_0^S \sin\alpha \sin\phi \, ds \vec{J} + \int_0^S \cos\alpha \, ds \vec{K} \end{aligned} \quad (B.4)$$

## 二. 井斜角和方位角的三次样条拟合

设从井深  $S_0$  始至  $S_n$  止共测的  $n+1$  个点的井深、井斜角和方位角:

$$S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$$

$$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$$

$$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$$

则非测点的井斜角和方位角可用下述三次样条插值角准确地确定。

分段函数  $\alpha(s)$  和  $\phi(s)$  在区间  $[S_i-1, S_i]$  的表达式分别为

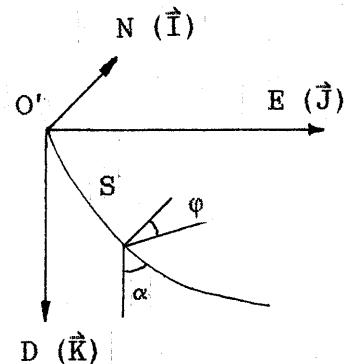


图 B. 空间笛卡尔坐标系  
和空间曲线坐标系

$$\alpha(s) = \alpha_{i-1} \frac{S_i - S}{h_{i-1}} + \alpha_i \frac{S - S_{i-1}}{h_{i-1}} \quad (B.5)$$

$$+ [A_i(S - S_{i-1}) + B_i(S - S_i)](S - S_{i-1})(S - S_i)$$

$$\varphi(s) = \varphi_{i-1} \frac{S_i - S}{h_{i-1}} + \varphi_i \frac{S - S_{i-1}}{h_{i-1}} \quad (B.6)$$

$$+ [a_i(S - S_{i-1}) + b_i(S - S_i)](S - S_{i-1})(S - S_i)$$

其中：

$$h_{i-1} = S_i - S_{i-1}$$

$$A_i = \frac{M_{i-1} + 2M_i}{6h_{i-1}}$$

$$B_i = - \frac{2M_{i-1} + M_i}{6h_{i-1}}$$

$$a_i = \frac{m_{i-1} + 2m_i}{6h_{i-1}}$$

$$b_i = - \frac{2m_{i-1} + m_i}{6h_{i-1}}$$

系数  $M_i, m_i (i=0, \dots, n)$  既与井斜角、方位角的测量值有关，又与井口及井底处的条件有关。假设井口和井底的增斜率、增方位率均为常数或零，则有

$$m_0 = m_n = M_0 = M_n = 0 \quad (B.7)$$

若令

$$\mu_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i} \quad (B.8)$$

$$\lambda_i = 1 - \mu_i \quad (B.9)$$

则  $M_i (i=1, 2, \dots, n-1)$  满足

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = D_i \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (B.10)$$

其中

$$D_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left( \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{h_i} - \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$$

$m_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) 满足

$$\mu_{i-1}m_{i-1} + 2m_i + \lambda_im_{i+1} = d_i \quad (B.11)$$

其中

$$d_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left( \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h_i} - \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{h_{i-1}} \right)$$

### 三. 井眼轨迹的微分几何量

在摩擦阻力计算和井眼轨迹预测和控制中, 需用一些微分几何量, 下面就给出这些量的表达式:

#### 1. 切线

$$\vec{t} = \sin\alpha \cos\varphi \vec{I} + \sin\alpha \sin\varphi \vec{J} + \cos\alpha \vec{K} \quad (B.12)$$

由于在摩擦阻力计算和井眼轨迹控制中, 坐标系的原点取在钻头处, 其切线矢量是(B.12)式的相反矢量.

#### 2. 主法线

$$\begin{aligned} \vec{n} = -\frac{1}{K_b} & [ (\sin\alpha \sin\varphi \frac{d\varphi}{ds} - \cos\alpha \cos\varphi \frac{d\alpha}{ds}) \vec{I} \\ & - (\cos\alpha \sin\varphi \frac{d\alpha}{ds} + \sin\alpha \cos\varphi \frac{d\varphi}{ds}) \vec{J} \\ & + \sin\alpha \frac{d\alpha}{ds} \vec{K}] \end{aligned} \quad (B.13)$$

#### 3. 付法线

$$\vec{b} = \vec{t} \times \vec{n} \quad (B.14)$$

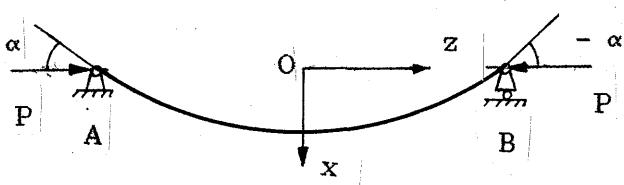
#### 4. 曲率

$$K_b = [(\frac{d\alpha}{ds})^2 + \sin^2\alpha (\frac{d\varphi}{ds})^2]^{1/2} \quad (B.15)$$

#### 5. 挠率

$$\begin{aligned} K_n = \frac{1}{K_b^2} & [2\cos\alpha \frac{d\varphi}{ds} (\frac{d\alpha}{ds})^2 - \sin\alpha \frac{d\varphi}{ds} \frac{d^2\alpha}{ds^2} \\ & + \sin\alpha \frac{d\alpha}{ds} \frac{d^2\varphi}{ds^2} + \sin^2\alpha \cos\alpha (\frac{d\varphi}{ds})^3] \end{aligned} \quad (B.16)$$

## 附录 C

两端铰支中心压杆的平面屈曲<sup>[87]</sup>

图C 两端铰支压杆的平面屈曲

位于A、B之间的处于屈曲状态的弹性杆，两端铰支。该杆在初始状态下是直的。杆长为L，具有均匀的抗弯刚度EI。在约束和压力P作用下，发生弹性屈曲。假设杆件屈曲后的轴向线长度不变，那么轴线坐标S处的弯矩M由下式给出：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} = - \frac{M}{EI} \quad (C.1)$$

其中， $\rho$  为曲率半径； $\theta$  为转角，顺时针为正。

根据力矩公式

$$M = P v \quad (C.2)$$

其中， $v$  -- 杆件中心偏离力的作用线的距离，

并令  $dv/ds = \sin \theta$

求得：

$$EI \frac{d^2\theta}{ds^2} + P \sin \theta = 0 \quad (C.3)$$

将上式两端乘以  $d\theta/ds$  并积分得：

$$\frac{EI}{2} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 - P \cos \theta = C \quad (C.4)$$

其中， $C$  为积分常数。

杆AB的弯曲形状可能包括若干个拐点，在该点弯曲消失。假设  $\theta$  是S的连续函数，则C可用拐点处( $d\theta/ds=0$ )的转角  $\alpha$  来表示，从(C.4)得：

$$C = - P \cos \alpha \quad (C.5)$$

使  $d\theta/ds = 0$  的其它可能值为  $\pm 2n\pi \pm \alpha$  ( $n$  为整数)。为此，理论上可以有无穷多个

拐点位于曲线上，而实际上只有两个。将(C.5)代入(C.4)得：

$$\frac{EI}{2P} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 - \cos\theta + \cos\alpha = 0 \quad (C.6)$$

该式就是弹性线的微分方程。

将(C.6)改写成

$$\frac{EI}{2P} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 = \sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (C.7)$$

由于方程左边非负，所以方程右边必须非负，即

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} \geq \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (C.8)$$

该式可用下式取代：

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \sin^2 \Theta = \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (C.9)$$

$\Theta$  是一个新的变量，称为压杆放大系数。

微分(C.9)得：

$$\frac{d\theta}{ds} = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \frac{\cos\Theta}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} \frac{d\Theta}{ds} \quad (C.10)$$

利用(C.7)、(C.9)得：

$$\frac{EI}{P} \left( \frac{d\Theta}{ds} \right)^2 = 1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin^2 \Theta \quad (C.11)$$

令  $\sin(\alpha/2) = K$ ，积分得

$$\left( \frac{PS^2}{EI} \right)^{1/2} = \int_0^\Theta \frac{d\Theta}{(1-K^2 \sin^2 \Theta)^{1/2}} + C_1 \quad (C.12)$$

其中， $C_1$  为积分常数。

假设 S 从  $\Theta = 0$  的点量起，此时  $C_1 = 0$ 。根据(C.9)，当  $\Theta = S = 0$  时， $\theta = 0$ 。为此 S 的原点位于两拐点中间。当  $\theta = \alpha$  时， $\Theta = \pi/2$ 。由此可确定变形曲线方程为：

$$\left( \frac{PS^2}{EI} \right)^{1/2} = \int_0^\Theta \frac{d\Theta}{(1-K^2 \sin^2 \Theta)^{1/2}} \quad (C.13)$$

在边界 A 点  $\theta_A = \alpha$ ,  $\Theta_A = \pm \pi/2$ ,  $L_A = -L/2$ ; 在 B 点,  $\Theta_B = \pm \pi/2$ ,  $\theta_B = -\alpha$ ,  $L_B = L/2$ 。将 B 点的边界条件代入(C.13)，得：

$$\left( \frac{PL^2}{EI} \right)^{1/2} = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{d\Theta}{(1-K^2 \sin^2 \Theta)^{1/2}} \quad (C.14)$$

根据此式求出 K 值后，再用(C.13)式求出 S 与  $\Theta$  的关系，进一步根据(C.9)求出 S 对应的  $\theta$  值，最后求出曲线在直角坐标下的表达式。

## 附录 D

非线性最小二乘最优化方法<sup>[89]</sup>

若最优化目标函数F为一组函数 $f_i$ 的平方和, 即:

$$F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\vec{x}) \quad (D.1)$$

其中,

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (n \leq m) \quad (D.2)$$

令

$$\vec{f}(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_m(\vec{x}))^T \quad (D.3)$$

则可将 F 表示为矢量点积的形式:

$$F(\vec{x}) = \vec{f}(\vec{x})^T \cdot \vec{f}(\vec{x}) \quad (D.4)$$

把向量函数 $f_i(\vec{x})$ 在 $\vec{x}_k$ 附近展开, 则有

$$f_i(\vec{x}) \doteq f_i(\vec{x}_k) + \nabla f_i(\vec{x}_k)^T (\vec{x} - \vec{x}_k) \quad (D.5)$$

其中,  $\nabla f_i(\vec{x}_k)$ 是函数 $f_i(\vec{x}_k)$ 在 $\vec{x}_k$ 处的梯度向量,

$$\nabla f_i(\vec{x}_k) = \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_1}, \frac{\partial f_i}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right)^T \Big|_{\vec{x}} = \vec{x}_k \quad (D.6)$$

因此, 在点 $x_k$ 附近目标函数F近似于二次函数,

$$\begin{aligned} F(\vec{x}) &\doteq \hat{F}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m [f_i(\vec{x}_k) + \nabla f_i(\vec{x}_k)^T (\vec{x} - \vec{x}_k)]^2 \\ &\doteq F(\vec{x}_k) + \vec{g}_k^T (\vec{x} - \vec{x}_k) + \frac{1}{2} (\vec{x} - \vec{x}_k)^T T_k (\vec{x} - \vec{x}_k) \end{aligned} \quad (D.7)$$

其中:

$$\vec{g}_k = \nabla F(\vec{x}_k) = 2 R_k^T \cdot \vec{f}(\vec{x}_k) \quad (D.8)$$

$$T_k = 2 R_k^T \cdot R_k \quad (D.9)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\vec{x}_k)}{\partial x_1}, & \frac{\partial f_1(\vec{x}_k)}{\partial x_2}, & \dots, & \frac{\partial f_1(\vec{x}_k)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(\vec{x}_k)}{\partial x_1}, & \frac{\partial f_2(\vec{x}_k)}{\partial x_2}, & \dots, & \frac{\partial f_2(\vec{x}_k)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m(\vec{x}_k)}{\partial x_1}, & \frac{\partial f_m(\vec{x}_k)}{\partial x_2}, & \dots, & \frac{\partial f_m(\vec{x}_k)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (D.11)$$

若  $F(\vec{x})$  是一个正定函数, 则它的唯一极小点可表示为

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \vec{P}_k \quad (D.12)$$

其中,

$$\vec{P}_k = -T_k^{-1} \cdot \vec{g}_k \quad (D.13)$$

若记目标函数  $F(\vec{x})$  的极小点  $\vec{x}^*$ , 而  $\vec{x}_k$  为  $\vec{x}^*$  的第  $k$  次近似, 则  $\vec{x}_{k+1}$  为  $\vec{x}^*$  的  $k+1$  次近似。这就是高斯牛顿法。当矩阵  $T_k$  为奇异时, 高斯-牛顿法没有实际意义, 处理这种情况时, 用最速下降法。

$$I \cdot \vec{P}_k = -\vec{g}_k \quad (D.14)$$

其中,  $I$  为单位矩阵。

为了在高斯-牛顿方向和最速下降方向之间或它们之间的所有方向进行选择, 引进参数  $\alpha$ , 使得

$$(T_k + \alpha I) \vec{P}_k = -\vec{g}_k \quad (D.15)$$

则有:

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - (T_k + \alpha I)^{-1} \vec{g}_k \quad (D.16)$$

其中,  $\vec{P}_k$  满足

$$F(\vec{x}_k + \vec{P}_k) \leq F(\vec{x}_k) + \beta \vec{g}_k^T \vec{P}_k \quad (D.17)$$

式中,  $0 < \beta < 1$ 。

## 一. LM算法

上面介绍的就是LM算法, 下面给出计算步骤:

1. 选取  $\beta \in (0, 1)$ ,  $\alpha_i > 0$  和增长因子  $\gamma > 1$ , 精度  $\varepsilon$ ;

2. 取初始点  $\vec{x}_1$ , 置  $k=1$ ;

3. 根据(D.8)式计算  $\vec{g}_k$ , 若  $\vec{g}_k = \vec{0}$  或小于给定的误差, 则停止计算;

4. 根据(D.9)式计算 $T_k$ , 并求

$$\vec{P}_k = -(T_k + \alpha_k I)^{-1} \vec{g}_k \quad (D.18)$$

5. 检验条件

$$F(\vec{x}_k + \vec{P}_k) \leq F(\vec{x}_k) + \beta \vec{g}_k^T \vec{P}_k \quad (D.19)$$

是否成立。若成立, 置 $\bar{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \vec{P}_k$ ,  $\alpha_{k+1} = \alpha_k / \gamma$ , 然后转6; 否则置 $\alpha_k = \gamma \alpha_k$ , 转4。

6. 置 $K = K+1$ , 转3。

若用LM算法太慢, 则可用下面介绍的LMF算法一般情况下都会提高计算速度。

## 二. LMF算法

LMF算法是在LM算法上发展而成的, 根据不同的情况调整参数 $\alpha$ 。LMF算法的步骤和调整 $\alpha$ 的方法如下:

1. 值要求精度 $\varepsilon$ , 选取 $\rho_1, \rho_2$  ( $0 < \rho_1 < \rho_2 < 1$ );
2. 置初始点 $\bar{x}_1, \alpha_1 = 0, k = 1$ ;
3. 计算 $\bar{g}_k$ , 若 $\|\bar{g}_k\| < \varepsilon$ , 则停止计算;
4. 计算 $T_k$ , 解方程

$$(T_k + \alpha_k I) \vec{P}_k = -\vec{g}_k \quad (D.20)$$

得 $\vec{P}_k$ :

5. 计算比例因子

$$\sigma_k = \frac{F(\vec{x}_k) - F(\vec{x}_k + \vec{P}_k)}{F(\vec{x}_k) - \hat{F}(\vec{x}_k + \vec{P}_k)} \quad (D.21)$$

根据 $\sigma_k$ 的大小, 分下面三种情况处理:

- (1) 当 $\sigma_k > \rho_2$ 时, 置 $\bar{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \vec{P}_k$ 。若 $\alpha_k/2 \geq \alpha_c$ , 则置 $\alpha_{k+1} = \alpha_k/2$ , 否则置 $\alpha_{k+1} = 0$ , 转3;
- (2) 当 $\rho_1 \leq \sigma_k \leq \rho_2$ , 置 $\bar{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \vec{P}_k$ ,  $\alpha_{k+1} = \alpha_k$ , 转3;
- (3) 当 $\sigma_k < \rho_1$ 时, 进行下述处理:
  - a. 若 $\alpha_k = 0$ , 则令

$$\alpha_c = \max \left\{ \frac{1}{\|T^{-1}(\vec{x}_k)\|_\infty}, \frac{1}{\text{Tr}[T^{-1}(\vec{x}_k)]} \right\} \quad (D.22)$$

其中, $\|T^{-1}(\vec{x}_k)\|_\infty$ 为 $T^{-1}$ 的 $l_\infty$ 范数,  $\text{Tr}[T^{-1}(\vec{x}_k)]$ 为 $T^{-1}$ 的迹。

置 $\alpha_{k+1} = \alpha_c$ , 转6;

b. 若 $\alpha_k \neq 0$ , 令

$$\frac{1}{\eta} = 2 - 2 \frac{F(\vec{x}_k + \vec{P}_k) - F(\vec{x}_k)}{\vec{P}_k^T \cdot \vec{g}_k} \quad (D.23)$$

并根据  $1/\eta$  确定  $\gamma$

$$\gamma = \begin{cases} \frac{1}{\eta} & (2 \leq \frac{1}{\eta} \leq 10) \\ 2 & (\frac{1}{\eta} < 2) \\ 10 & (\frac{1}{\eta} > 10) \end{cases} \quad (D.24)$$

置  $a_{k+1} = \gamma a_k$ , 转 6;

6. 若  $F(\bar{x}_k + \bar{P}_k) < F(\bar{x}_k)$ , 则令  $\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \bar{P}_k$ , 转 3; 否则, 转 4。

LMF 算法对一般问题的一般点下降较快, 但在鞍点及其邻域内时, 则可能下降很慢, 或不再下降, 此时可采用下面的 Hessian 算法。

### 三. Hessian 算法

Hessian 构造了一个更接近于  $F(\bar{x})$  的函数

$$\hat{F}(\vec{x}) = F(\vec{x}_k) + \vec{g}_k(\vec{x} - \vec{x}_k) + \frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{x}_k)^T G_k(\vec{x} - \vec{x}_k) \quad (D.25)$$

其中,

$$G_k = T_k + 2 \sum_{j=1}^m f_j(\vec{x}_k) \cdot \nabla^2 f_j(\vec{x}_k) \quad (D.26)$$

从而

$$\vec{P}_k = -G_k^{-1} \cdot \vec{g}_k \quad (D.27)$$

计算步骤如下:

1. 取初始点  $\bar{x}_1$ , 置  $k=1$ , 精度  $\epsilon$ ;
2. 根据(D.8)式计算  $\bar{g}_k$ , 若  $\|\bar{g}_k\| < \epsilon$ , 则停止计算;
3. 根据(D.27)计算  $\bar{P}_k$ ;
4. 置  $\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \bar{P}_k$ , 转 2。

## 附录 E NMH-1 水平井简介

NMH-1水平井是国家“八五”攻关项目“水平钻井技术”的重点工程，该井位于河北省沧县舍女寺东1.2公里舍女寺构造带34断块鼻高部位，设计斜深3896M，造斜点2450M，目标点垂深3050M，水平段长300M。该井于1991年8月8日开钻，9月4日固完1592M技术套管；10月3日2432M开始依设计用NAVY钻具和弯接头造斜，然后用普通增斜钻具增斜，实钻表明增斜效果太差，方位又不稳定，以致不可能用原设计钻具钻达目标点；在此情况下，决定钻探油层；92年2月8日钻至3318M探明油层后下第二层技术套管至3100M固井。3月11日交替用1.25度单弯导向钻具和稳斜钻具自3104M增斜钻进至3363M井斜达90度；此后用近稳斜钻具钻至3623M，于4月30日完钻。5月22日固井。

表 E-1 NMH-1水平井原设计井眼轨迹

井深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
0	0	—
2450	0	217.8
2500	5	217.8
2600	15	217.8
2700	25	217.8
2800	35	217.8
2900	45	217.8
3000	55	217.8
3100	65	217.8
3108	65.8	217.8
3188	65.8	217.8
3200	71	217.8
3300	81	217.8
3383	88	217.8
3500	88	217.8
3600	88	217.8
3696	88	217.8

表 E-2 NMH-1水平井参考设计井眼轨迹

井深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
0	0	—
2920	0	217.8
2950	9	217.8
3000	24	217.8
3050	39	217.8
3100	54	217.8
3150	69	217.8
3200	84	217.8
3220	90	217.8
3300	90	217.8
3400	90	217.8
3520	90	217.8

表 E-3 NMH-1 水平井实钻井眼轨迹

二开			三开			四开		
井深(米)	井斜角(度)	方位角(度)	井深(米)	井斜角(度)	方位角(度)	井深(米)	井斜角(度)	方位角(度)
0	0	—	3103	48.0	235			
300	1	65	3116	48.9	233			
600	0	—	3125	50.6	231			
800	.75	206	3144	52.9	224			
1200	.25	80	3158	53.6	225			
1500	1.2	115	3171	57.6	225			
1800	2.7	1	3190	64.5	226			
2100	1.3	357	3213	67.9	225			
2400	.7	351	3222	69.8	225.6			
2453	.6	225	3231	72.0	224			
2462	1.3	212	3242	72.9	224			
2471	2.2	215	3263	73.1	223			
2500	4.5	206	3278	73.6	223			
2545	7.75	197	3291	75.1	225			
2559	9.75	193	3315	82.6	224			
2565	10.1	198	3327	83.4	224			
2575	10	207	3349	86.0	224			
2587	10.1	212	3363	89.1	223			
2610	12.15	216	3371	89.1	223			
2639	13.8	217	3383	89.6	223			
2659	14.8	216	3403	90.4	223			
2672	15.7	217	3418	91.2	224			
2691	18.4	215	3427	91.8	223			
2712	20.3	216	3437	92.1	225			
2735	20.0	225	3453	91.4	225			
2750	20.5	229	3483	90.9	224			
2775	24.0	235	3472	90.8	224			
2805	27.5	237	3482	90.4	224			
2823	29.0	238	3500	90.0	224			
2851	32.5	237	3510	89.4	224			
2880	35.5	237	3520	89.3	224			
2912	40.0	237	3526	89	224			
2940	45.0	236	3542	88.8	224			
2982	45.0	233	3551	89.5	223			
3008	44.0	230	3561	90.5	223			
3041	43.0	232	3573	91.4	224			
3076	44.7	234	3578	90.9	224			
3103	48.0	235	3586	90.4	224			
3166	51.0	239	3596	90.5	224			
3235	54.0	238	3605	90.7	225			
3318	63.0	237	3622	90	225			

表 E-4 NMH-1井钻具组合

井段 M	钻 具 组 合	
2520 ~ 2561	220	311mmXHP2钻头(.3M)+310mm稳定器(1.985M)+178mm钻铤(17.67M)+521/630接头(.375M)+203mm无磁钻铤(9.11M)+310mm稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.1M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
2561 ~ 2601	80度	311mmR65ST PDC钻头(.31M)+203mmNAVY钻具(7.1M)+631/530接头(.64M)+1.8度弯接头(.64M)+203mm无磁钻铤(9M)+203mmMWD短节(1.9M)+安全接头(.64M)+203mm螺旋钻铤(44.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110.4M)+127mm钻杆
2601 ~ 2670	200	311mmJ22钻头(.3M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+521/630接头(.38M)+178mm无磁钻铤(8.9M)+178mm钻铤(9M)+521/630接头(.375M)+203mm钻铤(8.9M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(98.4M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
2670 ~ 2710	180	311mmJ22钻头(.3M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+631/410接头(.38M)+165mm无磁钻铤(10.4M)+411/410接头(.65M)+411/520接头(.38M)+178mm无磁钻铤(9M)+521/630接头(.375M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(98.4M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
2710 ~ 2722	80度	311mmR65ST PDC钻头(.31M)+203mmNAVY钻具(7.1M)+631/530接头(.64M)+2 度弯接头(.64M)+203mm无磁钻铤(9M)+203mmMWD短节(1.9M)+安全接头(.64M)+203mm螺旋钻铤(44.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110.4M)+127mm钻杆
2722 ~ 2785	170	311mmJ22钻头(.3M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+631/410接头(.38M)+165mm无磁钻铤(17.1M)+411/520接头(.38M)+521/630接头(.38M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆

## 续1

2785 ~ 2815	220	311mmXHP2钻头(.3M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+631/520接头(.38M)+178mm无磁钻铤(8.9M)+178mm钻铤(9M) 521/630接头(.38M)+310mm螺旋稳定器(1.9M) +203mm钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M) +203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.38M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
2815 ~ 2888	180 ~ 220	311mmJ3钻头(.3M)+631/520接头(.5M)+521/630接头(.38M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+631/520接头(.38M) +178mm无磁钻铤(8.9M)+521/630接头(.37M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M) +203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
2888 ~ 2952	200	311mmJ22钻头(.3M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+631/410接头(.38M)+185mm无磁钻铤(8.4M)+411/520接头(.38M)+178mm无磁钻铤(9M)+521/630接头(.38M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
2952 ~ 2987	-90度	311mm J3 钻头(.31M)+203mmNAVY钻具(7.1M)+631/530接头(.64M)+2 度弯接头(.64M)+203mm无磁钻铤(9M)+203mmMWD短节(1.9M)+安全接头(.64M)+203mm螺旋钻铤(53.6M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110.4M)+127mm钻杆
2967 ~ 3019	-90度	311mm J3 钻头(.31M)+203mmNAVY钻具(7.1M)+631/530接头(.64M)+2 度弯接头(.64M)+203mm无磁钻铤(9.1M)+203mmMWD短节(1.9M)+安全接头(.64M)+203mm螺旋钻铤(26.8M)+203mm钻铤(6M)+196mm震击器(5.1M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.355M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110.4M)+127mm钻杆
3019 3058	185	311mmXHP3钻头(.3M)+630/630接头(.5M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+203mm钻铤(2.9M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm无磁钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+196mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆

## 续 2

3058 ~ 3117	150	311mmJ22钻头(.3M)+310mm双母稳定器(1.985M)+631/410接头(.38M)+165mm无磁钻铤(8.4M)+411/520接头(.38M)+178mm无磁钻铤(8M)+521/630接头(.38M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
3118 ~ 3153	220	311XHP2钻头(.3M)+630/630接头(.5M)+310mm螺旋稳定器(1.985M)+631/410接头(.38M)+165mm无磁钻铤(8.4M)+411/4A10接头(.39M)+158mm钻铤(8.7M)+4A11/520接头(.38M)+178mm钻铤(8M)+521/630接头(.38M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.77M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+203mm震击器(6.5M)+203mm钻铤(6M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
3153 ~ 3173	200	311mmXHP2钻头(.3M)+630/630接头(.5M)+311mm螺旋稳定器(1.9M)+631/520接头(.36M)+178mm无磁钻铤(8.6M)+178mm钻铤(17.7M)+521/630接头(.37M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+197mm震击器(5.11M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
3173 ~ 3193	200	311mmJ22钻头(.3M)+630/630接头(.5M)+311mm螺旋稳定器(1.9M)+631/520接头(.36M)+178mm无磁钻铤(8.6M)+178mm钻铤(8.7M)+521/630接头(.37M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(80.6M)+203mm震击器(6.5M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
3193 ~ 3295	200	311mmJ22钻头(.3M)+630/630接头(.5M)+311mm螺旋稳定器(1.9M)+631/520接头(.36M)+178mm无磁钻铤(8.6M)+178mm钻铤(17.7M)+521/630接头(.37M)+203mm螺旋钻铤(88.4M)+197mm震击器(5.11M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆
3295 ~ 3317	200	311mmJ22钻头(.3M)+630/630接头(.5M)+311mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm钻铤(8.6M)+310mm螺旋稳定器(1.9M)+203mm螺旋钻铤(88.8M)+197mm震击器(5.11M)+203mm钻铤(6M)+203mm螺旋钻铤(17.8M)+631/520接头(.36M)+521/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(110M)+127mm钻杆

## 续 3

3104 ~ 3144	-40度	215mmPDC钻头(.25M)+165mm1.25度单弯马达(6.5M)+215mm稳定器(1.8M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/410接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+127mm厚壁钻杆(55M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(81M)+4A11/410接头(.4M)+159mm震击器(11M)+411/4A10(.4M)+159mm钻铤(18M)+4A11/410接头(.4M)+127mm厚壁钻杆(55M)+127mm钻杆
3144 ~ 3158	180	215XHP2钻头(.25M)+430/410接头(.5M)+214mm螺旋稳定器(1.89M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/410接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+214mm螺旋稳定器(1.8M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(9M)+4A11/410接头(.4M)+214mm螺旋稳定器(2M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(99.8M)+4A11/410接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/410接头(.38M)+127mm厚壁钻杆(92M)+127mm钻杆
3158 ~ 3197	0度	215mmSST钻头(.25M)+165mm1.25度单弯马达(6.5M)+431/4A10接头(.4M)+211mm稳定器(1.8M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/410接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+127mm厚壁钻杆(46M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(117M)+4A11/410接头(.4M)+159mm震击器(11M)+411/4A10(.4M)+159mm钻铤(18M)+4A11/410接头(.4M)+127mm厚壁钻杆(64M)+127mm钻杆
3197 ~ 3213	160	215XHP2钻头(.25M)+430/410接头(.5M)+214mm螺旋稳定器(1.89M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/410接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+214mm螺旋稳定器(1.8M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(117M)+4A11/410接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/410接头(.38M)+127mm钻杆
3213 ~ 3241	-10度	215mmSST钻头(.25M)+430/431接头(1.5M)+165mm1.25度单弯马达(6.5M)+431/4A10接头(.4M)+211mm稳定器(1.8 )+165mm无磁钻铤(9M)+165mmMWD短节(2M)+411/410接头(.8M)+165mm无磁钻铤(9M)+127mm厚壁钻杆(164M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(117M)+4A11/410接头(.4M)+159mm震击器(11M)+411/4A10(.4M)+159mm钻铤(18M)+4A11/410接头(.4M)+127mm钻杆
3241~ 3274	180	215J22钻头(.25M)+430/410接头(.5M)+214mm螺旋稳定器(1.89M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/410接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+214mm螺旋稳定器(1.8M)+127mm厚壁钻杆(220M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(117、145M)+4A11/410接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/410接头(.38M)+127mm钻杆
3274~ 3291 3315~ 3348	200	

## 续 4

3291 ~ 3315 3348 ~ 3363	10度 0度	215mmSST钻头(.25M)+165mm1.25度单弯马达(8.5M)+4A10接头(.4M)+211mm稳定器(1.8M)+165mm无磁钻铤(9M)+165mmMWD短节(2M)+411/4A10接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+127mm厚壁钻杆(220、246M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(145M)+4A11/4A10接头(.4M)+159mm震击器(11M)+411/4A10(.4M)+159mm钻铤(18M)+4A11/4A10接头(.4M)+127mm钻杆
3363~ 3384~ 3403~ 3438	120 160 120	215J22钻头(.25M)+214mm双母稳定器(2M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/4A10接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+214mm螺旋稳定器(1.8M)+127mm厚壁钻杆(250M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(145M)+4A11/4A10接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/4A10接头(.38M)+127mm钻杆
3438 ~ 3499	120	215J22钻头(.25M)+214mm稳定器(2M)+165mm钻铤(2.5M)+214mm稳定器(1.9M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/4A10接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+127mm厚壁钻杆(347M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(145M)+4A11/4A10接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/4A10接头(.38M)+127mm钻杆
3499~ 3542 3572~ 3593 3593~ 3622	160 180 180 160	215J22钻头(.25M)+214mm稳定器(2M)+165mm钻铤(2.5M)+214mm稳定器(1.9M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/4A10接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+127mm厚壁钻杆(113、180、198M)+127mm厚壁钻杆(347M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(145M)+4A11/4A10接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/4A10接头(.38M)+127mm钻杆
3542 ~ 3572	180	215ATJ33钻头(.25M)+214mm双母稳定器(2M)+165mm无磁钻铤(9.1M)+165mmMWD短节(2M)+411/4A10接头(.65M)+165mm无磁钻铤(9M)+210mm螺旋稳定器(1.8M)+127mm钻杆(171M)+127mm厚壁钻杆(347M)+411/4A10接头(.4M)+159mm钻铤(145M)+4A11/4A10接头(.4M)+158mm震击器(11M)+411/4A10接头(.4M)+158mm钻铤(18M)+4A11/4A10接头(.38M)+127mm钻杆

### 主要参考文献

1. C.A. Johancsik, D.B. Friesen and Rapier Dawson: "Torque and Drag in Directional Wells—Prediction and Measurement," paper IADC/SPE 11380 presented at the IADC/SPE 1983 Drilling Conference, New Orleans,Louisiana, February 20-23, 1983.
2. P.N. Jogi, T.M. Burgess and J.P. Bowling: "Three-Dimensional Bottomhole Assembly Model Improved Directional Drilling," paper IADC/SPE 14768 presented at the 1986 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas,TX, February 10-12,1986.
3. M.C. Sheppard, C. Wick and T. Burgess: "Designing Well Paths To Reduce Drag and Torque," paper SPE 15463 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibitions of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans,LA, October 5-8, 1986.
4. U. Chandra:"Basic Concepts in Static BHA Analysis for Directional Drilling," paper SPE 15467 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers,New Orleans,LA, October 5-8, 1986.
5. A.A. Besaisow and M. L. Payne:"A Study of Excitation Mechanisms and Resonances Inducing BHA Vibrations," paper SPE 15560 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers,New Orleans, LA,October 5-8,1986
6. H. S. Ho:"General Formulation of Drillstring Under Large Deformation and Its Use in BHA Analysis," paper SPE 15562 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers,Wew Orleans, LA,October 5-8,1986.
7. M. Lesage, I.G. Falconer and C. Wick: "Evaluating Drilling Practice in Deviated Wells With Torque and Weight Data," paper SPE/IADC 16114 presented at the 1987 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans,LA, March 15-18,1987.
8. P.A. Edlund: "Application of Recently Developed Medium Curvature Horizontal Drilling Technology in the Spraberr Trend Area," paper SPE/IADC 16170 presented at the 1987 SPE/IADC Drilling Conference,New Orleans,LA,March15-18,1987.
9. J.D. Brakel and J.J. Azar: "Prediction of Wellbore Trajectory

- Considering Bottomhole Assembly and Drill Bit Dynamics," paper SPE/IADC 16172 presented at the 1987 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, LA, March 15-18, 1987.
10. H-S. Ho: "Prediction of Drilling Trajectory in Directional Wells Via a New Rock-Bit Interaction Model," paper SPE 16658 presented at the 62st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX, September 27-30, 1987.
  11. E.E. Maidla and A.K. Wojtanowicz: "Field Comparison of 2-D and 3-D Methods for the Borehole Friction Evaluation in Directional Wells," Paper SPE 16663 presented at the 62st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX, September 27-30, 1987.
  12. J.F. Breet, A.D. Beckett, C.A. Holt and D.L. Smith: "Uses and Limitations of a Drillstring Tension and Torque Model To Monitor Hole Conditions," paper SPE 16664 presented at the 62st Annual Technical Conference and Exhibitionn of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX, september 27-30, 1987.
  13. S. Rafie: "Mechanistic Approach in Designing BHA's and Forecasting Wellbore Position," paper IADC/SPE 17196, presented at the 1988 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, February 28-March 2, 1988.
  14. S.L. Barrett and R.G. Lyon: "The Navigation System Proves Effective in Drilling Horizontal Wells in the Java Sea," paper IADC/SPE 17328 presented at the 1988 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, February 28-March 2,1988.
  15. H-S. Ho: "An Improved Modeling Program for Computing the Torque and Drag in Directional and Deep Wells," paper SPE 18047 presented at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX, October 2-5,1988.
  16. I.G. Falconer, J.P. Belaskie and F.Variava: "Application of a Real Time Wellbore Friction Analysis," paper SPE/IADC 18649 presented at the 1989 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans ,Louisiana , February 28-March 3,1989.
  17. F.V. DeLucia: "Benefits, Limitations, and Applicability of Steerable System Drilling," paper SPE/IADC 18656 presented at the 1989 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, February 28-March 3,1989.
  18. M. Birades and D.Gazaniol: "ORPHEE 3D: Original Results of the Directional Behavior of BHA's With Bent Subs," paper SPE 19244 presented at Offshore Europe 89, Aberdeen, Scotland,5-8

September 1989.

19. E.E. Maidla and J.H.B. Sampaio: "Field Verification of Lead Angle and Azimuth Rate of Change Predictions in Directional Wells Using a New Mathematical Model," paper SPE 19337 presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Morgantown, West Virginia, October 24-27, 1989.
20. J.B. Williams, M.C. Apostal and G.A. Haduch, Jordan, Apostal, Ritter Assocs: "An Analysis of Predicted Wellbore Trajectory Using a Three-Dimensional Model of a Bottomhole Assembly With Bent Sub, Bent Housing, and Eccentric Contact Capabilities," paper SPE 19545 presented at the 64th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, San Antonio, TX, October 8-11, 1989.
21. P.R. Paslay and D.B. Bogy: "The Stability of a Circular Rod Laterally Constrained to Be in Contact With an Inclined Circular Cylinder," Journal of Applied Mechanics (December 1964) 605-610.
22. B.H. Walker and M.B. Friedman: "Three-Dimensional Force and Deflection Analysis of a Variable Cross Section Drill String," Journal of Pressure Vessel Technology (May 1977) 367-373.
23. K.K. Milheim and M.C. Apostal: "The Effect of Bottomhole Assembly Dynamics on the Trajectory of a Bit," Journal of Petroleum Technology (December 1981) 2323-38. /SPE 9222.
24. J.B. Cheatham Jr. and C.Y. Ho: "A Theoretical Model for Directional Drilling Tendency of a Drill Bit in Anisotropic Rock," Mechanical Engineering and Materials Science Department, Rice University, Houston, Texas, September 1981. /SPE 10642.
25. R.F. Mitchell: "Buckling Behavior of Well Tubing: The Packer Effect," Society of Petroleum Engineers Journal (October 1982) 616-624. /SPE 9264.
26. J.B. Cheatham Jr. and P.D. Pattillo: "Helical PostBuckling Configuration of a Weightless Column Under the Action of An Axial Load," Society of Petroleum Engineers Journal (August 1984) 467-472. /SPE 10854.
27. Rapier Dawson and P.R. Paslay: "Drillpipe Buckling in Inclined Holes," Journal of Petroleum Technology (October 1984) 1734-1738. /SPE 11167.
28. R.F. Mitchell: "Simple Frictional Analysis of Helical Buckling of Tubing," SPE Drilling Engineering (December 1986) 457-465. /SPE 13064.

29. J.S. Williamson and A. Lubinski: "Predicting Bottomhole Assembly Performance," SPE Drilling Engineering (March 1987) 37-46. /SPE 14764.
30. H.S. Ho: "Discussion of Predicting Bottomhole Assembly Performance," SPE Drilling Engineering (September 1987) 283 -284. /SPE 17015.
31. R.F. Mitchell: "New Concepts for Helical Buckling," SPE Drilling Engineering (September 1988) 303-310. /SPE 15470.
32. Young W. Kwon: "Analysis of Helical Buckling," SPE Drilling Engineering (June 1988) 211-216.
33. Yu-Che Chen, Yu-Hsu Lin and J.B. Cheatham: "Tubing and Casing Buckling in Horizontal Wells," JPT (February 1990) 140-141, 191.
34. Richard S. Carden, Grace, Shursen, Moore: "Calculating the Maximum Horizontal Wellbore Length," Fourth UNITAR/UNDP International Conference on Heavy Crude and Tar Sands (paper No. 207) 137-155.
35. Eric E. Maidla and Andrew K. Wojtanowicz: "Laboratory Study of Borehole Friction Factor With a Dynamic-Filtration Apparatus," SPE Drilling Engineering (September 1990) 247-255./SPE 18558.
36. F.J. Schuh: "The Critical Buckling Force and Stresses for Pipe in Inclined Curved Boreholes, paper SPE/IADC 21942 presented at the 1991 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 11-14 March 1991.
37. Green.A.E: Large Elastic Deformations and Non-Liner Continuum Mechanics, Oxford ,At the Clarendon,1960.
38. 白家祉: 应用纵横弯曲连续梁理论求解钻具的受力与变形, 北京国际石油工程会议论文集, SPE 10561, 1982, 106-117
39. 白家祉: 关于防斜钻具的选择, 石油钻采工艺, 1985;(1):1-7
40. 白家祉, 林小敏: 纵横弯曲法对钻具组合的二维分析, 石油学报, 1985; 6(3):75-84
41. 白家祉, 黄惠泽, 刘玉石: 纵横弯曲法对钻具组合的三维分析, 石油学报, 1989;10(2):60-66
42. 白家祉, 苏义脑: 井斜控制理论与实践, 石油工业出版社, 1990年4月
43. 高德利: 钻头与地层相互作用研究、BHA 权余法分析及井眼轨迹控制技术, 石油大学博士论文, 1990年3月.
44. 刘希圣, 高德利, 崔孝秉: 底部钻具组合三维静力分析的权余法, 石油大学学报, 1988;12(3):58-67
45. 高德利, 刘希圣, 黄荣樽: 钻头与地层相互作用的三维宏观分析, 石油大学学报, 1989;13(1):23-31

46. 高德利, 刘希圣: 钻头与地层相互作用的新模型, 石油钻采工艺, 1989; (5):29-32
47. 蔡强康, 吕英民, 帅健: 下部钻具组合的特性分析, 石油大学学报, 1988; 12(3):68-78
48. 吕英民, 蔡强康: 岩石的各向异性对定向钻井井斜的影响, 石油大学学报, 1988; 12(3):79-85
49. 袁祥忠, 梁政: 斜直井内下部钻柱空间弯曲变形的探讨, 石油学报, 1987; 8(1):103-112
50. 梁政, 袁祥忠: 斜直井内多稳定器钻柱的空间弯曲变形, 西南石油学院学报, 1989; 11(1):73-80
51. 梁政: 钻柱扶正器合理安放位置的计算, 石油钻探技术, 1990; 18(1): 21-26
52. 章杨烈: 采用井底动力机钻直井时钻柱受压段的空间弯曲变形问题, 石油矿场机械, 1985; 14(1):14-25
53. 章杨烈, 肖载阳, 端木纲: 旋转钻柱的运动原理及其应用, 兰州石油机械研究所, 1987年10月
54. 王珍应, 徐铭陶: 用加权残数法计算弯曲井眼内钟摆钻具的变形及扶正器位置的优化设计, 天然气工业, 1988; 8(3):45-49
55. 代民英, 李子丰: 钻压法控制井眼轨迹的理论探讨, 石油钻采工艺, 1987; (4):29-32
55. 武际可, 黄永刚: 弹性曲杆的稳定性问题, 力学学报, 1987; 19(5):445-454
56. 刘希圣等译: 钻井的防斜理论和方法, 中国工业出版社, 1985
57. 赵国珍, 龚伟安: 钻井力学基础, 石油工业出版社, 1988
58. 刘希圣主编: 钻井工艺原理, 石油工业出版社, 1988
59. 大庆石油学院开发系, 机械系: 大庆地区定向井井眼轨迹控制的研究, 1988年12月
60. 田效山: 钻头与地层相互作用影响井斜的理论分析及现场井斜资料的统计分析, 石油大学北京研究生部研究生毕业论文, 1989
61. 刘修善: 定向井待钻井眼轨迹的设计方法, 大庆石油学院研究生毕业论文, 1990
62. 舒中选: 井眼—钻具系统力学模型的研究及在大庆地区的应用, 大庆石油学院研究生毕业论文, 1990
63. 潘卫国: 定向井中钻柱摩擦损失研究及应用, 大庆石油学院研究生毕业论文, 1990
64. 张建群, 孙学增, 潘卫国: 国内外定向井摩擦阻力—扭矩研究现状, 1990年5月
65. 徐小荷, 余静: 岩石破碎学, 煤炭工业出版社, 1984
66. 梅向明, 黄敬之: 微分几何, 人民教育出版社, 1981

67. 徐次达: 固体力学加权残值法, 同济大学出版社, 1987
68. H.K.斯尼特科: 杆系的稳定性, 建筑工业出版社, 1956
69. 邓乃扬: 无约束最优化计算方法, 科学出版社, 1982
70. 沈信祥, 汪胡桢: 现代工程数学手册 1-5卷, 华中工学院出版社, 1986年  
-1990年
71. 聂铁军: 计算方法, 国防工业出版社, 1988
72. 四川石油管理局, 西南石油学院: 钻井测试手册, 石油化学工业出版社,  
1978

## 致 谢

在攻读博士学位三年多的时间内始终得到了导师刘希圣教授和黄荣樽教授的悉心的指导、帮助和鼓励，值此论文完成之际，谨向尊敬的两位导师表示衷心的感谢。

本文属于“八五”国家重点科技攻关项目“水平钻井技术”的专题内容。在研究过程中得到了专题负责人高德利博士的正确领导。在大港合作攻关期间，得到了攻关领导小组大港石油管理局总工程师王寿增、科技处长杨天吉、钻井公司经理朱敬臣、曲经文、钻井总工程师苗树富同志的大力支持和关怀以及井场监督王福元、王锡普、杨建乐、刘少亭和泥浆分公司宗瑞国工程师等技术人员的热情帮助和通力合作，借此机会向上述领导和工作人员表示诚挚的谢意。

大庆石油学院原党委书记龙乃昌、副院长刘业厚、科技处长张宏亮和开发系主任李邦达对本人的学业给予了全力支持和热心帮助，值此论文完成之际，向四位老师表示衷心的感谢。

大庆石油学院钻井教研室为本研究提供了上机条件，张建群教授和周大干副教授通阅了本文手稿并提出了许多宝贵意见，中国矿业大学北京研究生部陈至达教授给予了热心指导，特此致谢。



中国石油大学



刘希圣教授



博士答辩进行中



博士答辩合影