

刘清友 孟庆华 庞东晓 著

# 钻井系统动力学 仿真研究及应用



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 钻井系统动力学仿真研究及应用

刘清友 孟庆华 庞东晓 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书构建了包括钻井系统动力学建模、钻头及钻柱动静态特性分析、钻柱与井壁接触问题、井眼轨迹预测与控制问题等内容的钻井系统动力学行为理论体系;分别建立了基于钻柱、BHA、钻头、井底岩石、井壁等相互作用下的钻井系统动力学模型、钻头在钻井过程中的位移模型和井眼轨迹预测模型等,并根据所建多重数学模型,开展了确定性与随机性、连续变量与离散变量耦合作用的大型非线性系统的数值求解方法研究;结合工程的应用阐述了与钻井系统密切相关的优化设计理论和防斜控制技术,以及自行研发的仿真分析软件。

本书可作为石油高等院校研究生教材,也可作为石油工程、机械设计、应用力学和计算机科学等专业领域的工程技术人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

钻井系统动力学仿真研究及应用/刘清友,孟庆华,庞东晓著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023634-0

I. 钻… II. ①刘… ②孟… ③庞… III. 油气钻井—系统动力学  
IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195054 号

责任编辑:陈 婕 王志欣 / 责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1—1 500

字数:255 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈长虹〉)

## 序

钻井系统动力学是钻井工程应用基础理论的重要组成部分,也是确保油气钻井成功的技术关键。自 20 世纪 50 年代,Lubinski 首次对钻柱静力学进行了较为系统的研究以来,钻柱动力学研究一直是国内外钻井界专家研究的重要课题之一。随着我国油气资源的勘探开发逐渐由浅部向深部发展,包括气体钻井等特殊工艺井钻井工作量不断增大,如何准确地了解钻井系统动力学特性及科学的井眼轨迹预测方法,是确保特殊工艺井和深井超深井钻井成功、提高钻井质量及钻井效率、降低钻井成本的理论基础和关键技术问题,也是目前油气资源勘探开发中急需解决的重要课题之一。为了能够实现对钻井系统的动力学性能及井眼轨迹的合理设计与有效控制,人们始终坚持开展钻井系统动力学特性规律的探索和研究,其中,利用非线性科学理论方法研究钻井系统动力学问题是近年来石油工程界热衷的研究课题。

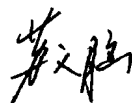
本书第一作者刘清友教授早在 20 世纪 80 年代就开始致力于研究钻井系统动力学行为,并取得了可喜的进展。他的研究范围主要涉及钻井系统动力学建模、基于钻头与岩石相互作用下钻柱静动态特性仿真分析、钻柱与井壁接触问题、井眼轨迹预测与控制问题等内容。他承担了多项国家自然科学基金项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家科技支撑计划项目、国家技术创新工程项目、教育部博士学科点专项基金项目、国际合作项目、石油科技中青年创新基金项目、四川省杰出青年学科带头人培养基金项目,等等。这些工作对于促进钻井系统动力学行为研究做出了有益的贡献。

本书综合利用了牙轮钻头破岩机理、岩石破碎力学、定向钻井技术、振动理论、弹性接触理论、有限元分析方法、元胞自动机理论、小波分析理论、计算机仿真技术等多学科交叉技术,通过理论研究、计算机仿真、单元实验、现场测试与现场数据统计分析相结合的科研方法,在构建钻井系统动力学行为理论体系方面进行了有益的探索和尝试。本书注重理论与实践相结合,在系统介绍钻井系统动力学理论的同时,给出大量的工程实例和实验分析,如开展了气体钻井优化设计理论和控制技术、小井眼侧钻水平井钻柱动力学分析等。这些内容将有助于读者对本书所介绍

理论的理解与应用。

现在,他们将多年研究成果结集出版,该著作具有一定的理论前沿性、方法实用性和内容系统性,特色突出。祝贺此书正式出版,相信它对于进一步推动钻井系统动力学行为的深入研究、进一步完善钻井系统动力学理论体系会有积极的意义。

中国工程院院士



2008年11月11日

## 前 言

钻柱力学是石油钻探工程的理论基础,而钻柱动力学又是真实描述和计算当前钻井工程中若干迫切需要解决的力学问题的理论基础和技术关键。我国油气资源勘探开发不断深入,已从常规油藏向隐蔽油藏、裂缝性油藏发展,从浅部向深部发展,从东部向西部和海洋发展,钻井环境愈发恶劣,钻井难度不断加大,新的钻井技术和钻井工艺(复杂结构井、特殊工艺井、深井超深井、小井眼井等)不断出现并被广泛采用,但随之而来的一些技术难题,如钻柱失效问题、摩阻计算问题、井眼轨迹难以精确预测和控制等问题严重制约了我国当前勘探开发的进程。因此有必要建立和完善钻井系统动力学理论,弄清运动钻柱的动力学特性,为新的钻井技术和钻井工艺提供理论支撑和技术手段,加速我国石油天然气勘探开发速度,提高我国钻井工艺技术整体水平和国际竞争能力。

作者从 20 世纪 80 年代开始致力于油气井工程力学、油气装备现代设计与仿真等方面的教学与科研工作。在教学和科研工作中,逐步形成了一套独有的集基础理论研究、实验研究、新产品研制、产业化推广应用于一体的深井高速牙轮钻头研发新体系;创建和发展了深井、水平井等特殊油气井管柱力学理论模型和设计方法;在国内外率先提出基于钻井系统动力学的井眼轨迹预测与控制的理论模型;开发了具有自主知识产权的油气勘探开发专用仿真软件 6 套,其中 2 套已获国家软件著作权登记;研制了多种具有自主知识产权的石油天然气装备新产品,已为企业创造大量的经济效益。

本书的主要内容包括:钻井系统及钻井系统动力学研究内容及发展概况(第一章);直井段、曲井段钻柱几何非线性动力学分析,钻柱参考构形及初始问题研究,井眼内钻柱与井壁接触非线性动力学研究(第二、三、四章);气体钻井防斜技术研究,小井眼侧钻水平井钻柱动力学分析及仿真软件开发(第五、六章);在岩石性能研究的基础上建立钻头动力学模型、井眼轨迹预测模型,钻井系统动力学及井眼轨迹仿真软件开发(第七、八、九章)。另外,在附录中,给出了曲井段钻柱几何非线性曲线梁形函数、常用小波函数性质及仿真分析部分数据供读者参阅。

本书主要内容是多年从事钻井系统动力学研究的理论成果的总结,其中有国家自然科学基金“基于钻柱、岩石互作用下牙轮钻头系统动力学特性研究”(批准号 59804009)、国家自然科学基金“基于钻头动力学的井眼轨迹预测理论与控制方法研究”(批准号 50474040)、国家自然科学基金“基于气体钻井的钻井系统动力学特性研究”(批准号 50874096)、国家自然科学基金“基于快速钻井工况的牙轮钻头浮

动套轴承工作机理研究”(批准号 50674078)、教育部博士学科点专项科研基金“高速牙轮钻头轴承设计理论及方法研究”(批准号 20050615003)、四川省杰出青年基金“基于钻井系统动力学的井眼轨迹预测与控制方法仿真研究”、石油科技中青年创新基金“基于钻头动力学的井眼轨迹控制与设计理论及方法研究”、石油科技中青年创新基金“钻井系统动力学特性仿真研究”等基金课题中的部分研究内容。

本书具有以下特点:

(1) 内容新颖。仅收入作者近几年的研究成果,其他教材和专著中的内容不再收入。

(2) 理论性强。本书系从国家自然科学基金项目等最新研究成果中提炼而来,凝集了较深的数学理论、力学理论和专业知识。

(3) 逻辑性强。本书紧紧围绕钻井系统动力学及其应用问题展开研究,中心突出,环环相扣,翔实系统的进行分析说明。

(4) 实用性强。本书既有理论成果,也有应用实例,理论与工程实践相结合,多学科交叉融合,深入浅出。

在本书即将出版之际,首先要感谢苏义脑院士为本书作序,感谢为本书研究成果做出贡献的况雨春博士、祝效华博士和胡琴博士,感谢鲁柳利硕士、黎伟硕士、陈沛民硕士协助整理书稿与绘制插图,感谢国家自然科学基金、教育部博士学科点专项科研基金、四川省杰出青年基金、石油科技中青年创新基金等对研究工作的持续资助,感谢科学出版社在本书出版过程中的全力支持与帮助。

由于水平和时间所限,书中不妥之处在所难免,诚请专家和读者批评指正。

作 者

2008 年 10 月于西南石油大学

# 目 录

序

前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 绪论                 | 1  |
| § 1.1 钻井系统概述           | 1  |
| § 1.2 钻井系统动力学概述        | 3  |
| 参考文献                   | 11 |
| 第二章 钻柱几何非线性动力学研究       | 15 |
| § 2.1 直井段钻柱几何非线性动力学分析  | 15 |
| 2.1.1 基本假设             | 15 |
| 2.1.2 钻柱系统动力学的直线梁格式    | 16 |
| 2.1.3 直线梁位移函数          | 18 |
| 2.1.4 直线梁钻柱单元刚度矩阵      | 19 |
| 2.1.5 直线梁钻柱单元质量矩阵      | 21 |
| 2.1.6 直线梁钻柱单元阻尼矩阵      | 22 |
| 2.1.7 直线梁钻柱单元组集整体矩阵    | 23 |
| 2.1.8 直线梁钻柱的三维坐标转换     | 24 |
| § 2.2 曲井段钻柱几何非线性动力学分析  | 26 |
| 2.2.1 曲线梁位移函数          | 27 |
| 2.2.2 钻柱系统动力学的曲线梁格式    | 30 |
| 2.2.3 曲线梁钻柱单元刚度矩阵      | 31 |
| 2.2.4 曲线梁钻柱单元质量矩阵和阻尼矩阵 | 32 |
| 参考文献                   | 32 |
| 第三章 钻柱参考构形及初始问题研究      | 34 |
| § 3.1 基于数学描述的钻柱参考构形分析  | 35 |
| 3.1.1 钻柱参考构形问题描述       | 35 |
| 3.1.2 钻柱参考构形轴线位置坐标插值函数 | 36 |
| 3.1.3 钻柱参考构形轴线位置坐标的导函数 | 38 |
| 3.1.4 钻柱参考构形轴线的曲率和挠率   | 38 |
| § 3.2 基于数学描述的钻柱初始问题分析  | 39 |
| 3.2.1 初位移的计算           | 40 |



|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| 3.2.2 单元畸变的计算 .....                 | 41        |
| 3.2.3 单元内初始内力的等效节点力 .....           | 42        |
| 参考文献 .....                          | 44        |
| <b>第四章 井眼内钻柱与井壁接触非线性动力学研究 .....</b> | <b>45</b> |
| § 4.1 钻柱接触碰撞非线性动力学分析 .....          | 45        |
| 4.1.1 接触碰撞非线性问题 .....               | 45        |
| 4.1.2 钻柱与井壁接触碰撞定解条件 .....           | 46        |
| 4.1.3 接触非线性动力学有限元格式 .....           | 48        |
| § 4.2 基于元胞自动机的钻柱非线性动力学研究 .....      | 48        |
| 4.2.1 元胞自动机基本理论 .....               | 49        |
| 4.2.2 基于元胞自动机的钻柱非线性动力学求解方法 .....    | 51        |
| 4.2.3 元胞自动机计算实例 .....               | 53        |
| 参考文献 .....                          | 55        |
| <b>第五章 基于钻柱动力学气体钻井防斜技术研究 .....</b>  | <b>56</b> |
| § 5.1 气体钻井井斜机理分析 .....              | 56        |
| § 5.2 气体钻井防斜技术 .....                | 59        |
| § 5.3 气体钻井下部钻具组合有限元分析 .....         | 61        |
| 5.3.1 气体钻井中钻柱动力学的有限元分析 .....        | 61        |
| 5.3.2 气体钻井中下部钻具组合动力学分析 .....        | 63        |
| § 5.4 气体钻井钻柱动力学特性仿真结果分析 .....       | 74        |
| 参考文献 .....                          | 90        |
| <b>第六章 小井眼侧钻水平井钻柱动力学分析 .....</b>    | <b>91</b> |
| § 6.1 钻柱摩阻模型建立 .....                | 91        |
| 6.1.1 基本假设与坐标系的建立 .....             | 91        |
| 6.1.2 建立模型 .....                    | 92        |
| 6.1.3 旋转钻进状态时的摩阻模型 .....            | 96        |
| 6.1.4 复合运动摩阻系数的确定 .....             | 96        |
| 6.1.5 黏滞力数学模型 .....                 | 97        |
| § 6.2 小井眼侧钻水平井钻柱动力学分析 .....         | 98        |
| 6.2.1 钻柱系统动力学模型的建立 .....            | 98        |
| 6.2.2 钻柱的外载荷 .....                  | 98        |
| 6.2.3 结构动力学非线性方程 .....              | 100       |
| 6.2.4 钻柱与井壁接触的力学模型 .....            | 100       |
| § 6.3 动力学模型的边界条件 .....              | 105       |
| 6.3.1 上端边界条件 .....                  | 105       |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 6.3.2 下端边界条件 .....                    | 106        |
| § 6.4 小井眼侧钻水平井动力学评价系统软件 .....         | 107        |
| 6.4.1 评价系统软件设计 .....                  | 107        |
| 6.4.2 各个模块功能说明 .....                  | 110        |
| 6.4.3 软件运行环境 .....                    | 115        |
| § 6.5 小井眼侧钻水平井钻柱仿真分析 .....            | 115        |
| 6.5.1 小井眼侧钻水平井钻柱静力学仿真分析 .....         | 116        |
| 6.5.2 小井眼侧钻水平井钻柱动力学仿真分析 .....         | 119        |
| 参考文献 .....                            | 125        |
| <b>第七章 基于多自由度牙轮钻头动力学的井眼轨迹研究</b> ..... | <b>127</b> |
| § 7.1 岩石物理力学性能试验研究 .....              | 127        |
| 7.1.1 嘉陵江灰岩的物性描述 .....                | 127        |
| 7.1.2 岩石抗拉强度测定 .....                  | 128        |
| 7.1.3 岩石单轴抗压强度试验 .....                | 129        |
| 7.1.4 岩石三轴强度试验 .....                  | 131        |
| 7.1.5 岩石的硬度和塑性系数测定 .....              | 134        |
| 7.1.6 岩石的可钻性测定 .....                  | 135        |
| 7.1.7 嘉一灰岩力学性能分析 .....                | 137        |
| § 7.2 钻头破岩机理研究 .....                  | 138        |
| 7.2.1 分析破岩应力的理论基础 .....               | 138        |
| 7.2.2 岩石在不同硬质合金镶齿压入时的应力分布 .....       | 139        |
| 7.2.3 岩石在不同齿形压入时破碎的基本特点 .....         | 146        |
| § 7.3 牙轮钻头几何模型 .....                  | 147        |
| 7.3.1 坐标系的建立 .....                    | 147        |
| 7.3.2 牙轮上任一点的几何学基本方程 .....            | 147        |
| 7.3.3 牙轮结构仿真模型 .....                  | 148        |
| § 7.4 九自由度牙轮钻头动力学模型 .....             | 149        |
| 7.4.1 三牙轮钻头动力学模型 .....                | 150        |
| 7.4.2 接触齿受力模型 .....                   | 151        |
| § 7.5 井眼轨迹仿真模型 .....                  | 152        |
| 7.5.1 井底和井壁几何模型描述 .....               | 153        |
| 7.5.2 钻头动坐标变换 .....                   | 154        |
| 7.5.3 钻头位移模型 .....                    | 155        |
| § 7.6 基于牙轮钻头动力学的井眼轨迹模拟 .....          | 155        |
| 7.6.1 计算方法 .....                      | 155        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 7.6.2 仿真试验与结果分析 .....             | 156        |
| 参考文献 .....                        | 161        |
| <b>第八章 基于小波分析的井眼轨迹预测模型</b> .....  | <b>163</b> |
| § 8.1 基于小波分析的预测方法研究 .....         | 163        |
| 8.1.1 小波分析概述 .....                | 163        |
| 8.1.2 小波分析的基本理论 .....             | 164        |
| 8.1.3 小波分析在井眼轨迹预测研究中的应用 .....     | 165        |
| § 8.2 基于小波分析的井眼轨迹预测模型的建立和求解 ..... | 168        |
| 8.2.1 井眼轨迹的小波包分解 .....            | 168        |
| 8.2.2 井眼轨迹组合预测模型 .....            | 170        |
| § 8.3 仿真试验和结果分析 .....             | 173        |
| 参考文献 .....                        | 175        |
| <b>第九章 钻井系统动力学及井眼轨迹模拟研究</b> ..... | <b>177</b> |
| § 9.1 仿真策略 .....                  | 177        |
| § 9.2 程序结构和算法设计 .....             | 180        |
| § 9.3 仿真试验结果分析 .....              | 182        |
| 9.3.1 边界条件及参数计算 .....             | 182        |
| 9.3.2 仿真实例 .....                  | 185        |
| 参考文献 .....                        | 196        |
| <b>附录 1 曲线梁形函数中非零元素表达式</b> .....  | <b>198</b> |
| <b>附录 2 常用小波函数的主要性质</b> .....     | <b>199</b> |
| <b>附录 3 仿真数据</b> .....            | <b>200</b> |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 钻井系统概述

钻井系统动力学是研究在不同钻井条件下,包括钻机、钻柱、钻头、岩石及钻井液等组成的系统的力学行为。为此,必须对影响钻井系统动力学的主要因素、工艺技术和生产作业环境等有所了解。

在油气勘探开发中,钻井起着十分重要的作用,如寻找和证实含油气构造、获得工业油流、探明已证实的含油(气)构造的含油(气)面积和储量,以及取得有关油田的地质资料和开发数据等。钻井是勘探与开采石油及天然气资源的一个重要环节,是勘探和开发石油的重要手段。在不同的工程阶段,钻井的目的和任务也不一样,一些是为了探明储油构造,另一些则是为了开发油田、开采原油。为了适应不同阶段、不同任务的需要,钻井的种类可分为基准井、剖面井、参数井、构造井、探井、资料井、生产井、注水(气)井、检查井、观察井、调整井等不同类型。在整个油气田的开发中,有勘探、建设、生产三个阶段,各阶段彼此相互联系,都需要进行大量钻井作业<sup>[1]</sup>。

到目前为止,旋转钻井方法仍是石油钻井的主要方法。随着现代科学技术的发展,旋转钻井工艺技术也得到迅速发展,其特点是:从经验钻井发展到科学化钻井;从浅井、中深井发展到深井、超深井;从钻直井(垂直井)、定向井发展到大斜度定向井、丛式井、水平井、大位移井等;从陆地钻井发展到近海和深海钻井。

在石油钻井中,尽管钻井目的不同,井的深浅各异,但是不论是在陆地还是在海上,一口井的建井过程从确定井位到最后试油、投产要完成许多作业,按其顺序均可分为三个阶段,即钻前准备、钻进和固完井,而每个阶段又包括许多具体工艺作业。

### (1) 钻前准备。

在确定井位、完成井的设计后,钻前工程是钻井施工中的第一道工序,它主要包括:修公路,井场及设备基础准备,钻井设备搬运及安装,井口设备准备等。

### (2) 钻进。

钻进是以一定压力作用在钻头上,并带动钻头旋转使之破碎井底地层岩石,井底岩石被破碎后所产生的岩屑通过循环钻井液被携带到地面上来,这一过程称为洗井。

在钻进中,钻头不断破碎岩石,井眼逐渐加深,则钻柱也需要接长,因而需要不断加接钻杆(接单根)。

由于钻头在井底破碎岩石,钻头会逐渐磨损,机械钻速下降,当磨损到一定程度则需要更换新钻头。为此,需将全部钻柱从井内起出(起钻),更换新钻头后再将新钻头及全部钻柱下入井内(下钻),这一过程称为起下钻。有时为了处理事故、测井等也需进行起下钻作业。

每改变一次钻头尺寸(井眼尺寸),开始钻新的井段的工艺称为开钻。一般情况下,一口井的钻进过程中应有几次开钻,井深和地层情况不同,则开钻次数也不同。

### (3) 固井和完井。

固井是在已钻成的井眼内下入套管,然后在套管与井壁之间的环形空间内注入水泥浆(在套管的下段部分或全部环空)将套管和地层固结在一起的工艺过程。套管柱的上部在地面用套管头予以固定。

完井工程包括:钻开生产层,确定油、气层和井眼的连通方式即完井井底结构,确定完井的井口装置及有关技术措施。完井的井底结构可分为四类:封闭式井底、敞开式井底、混合式井底和防砂完井。它们分别适应不同的油、气层条件。完井作业还包括下油管、装油管头和采油树,然后进行替喷、诱导油流使油气进入井眼,进而便可进行采油生产。另外,在整个油井的建井过程中还需进行岩屑录井、电测、气测等录井工作,必要时取心。探井在钻到油层时要进行钻杆测试工作。

钻井最终形成的空间轨迹称之为井眼轨迹,实指井眼轴线。一口实钻井的井眼轴线乃是一条空间曲线。为了开展钻井系统动力学研究,就要了解这条空间曲线的形状,并对井眼轨迹井下测量,这就是“测斜”。目前常用的测斜方法并不是连续测斜,而是每隔一定长度的井段测一个点。这些井段被称为“测段”,这些点被称为“测点”。测斜仪器在每个点上测得的参数有三个,即井深、井斜角和井斜方位角。这三个参数就是轨迹的基本参数,如图 1.1 所示。

井深是指井口(通常以转盘面为基准)至测点的井眼长度。井深是以钻柱或电缆的长度来量测。井深既是测点的基本参数之一,又是表明测点位置的标志,单位为米。井深的增量称为井段,两测点之间的井段称为测段。

井斜角是井眼方向线与重力线之间的夹角,常用  $\alpha$  表示。过井眼轴线上某测点作井眼轴线的切线,该切线向井眼前进方向延伸的部分称为井眼方向线。

井斜方位角是指以正北方位线为始边,顺时针方向旋转到井眼方位线上所转过的角度,用  $\beta$  表示。将某测点处的井眼方向线投影到水平面上,称为井眼方位线,或井斜方位线。此时正北方位线是指地理子午线沿正北方向延伸的线段。

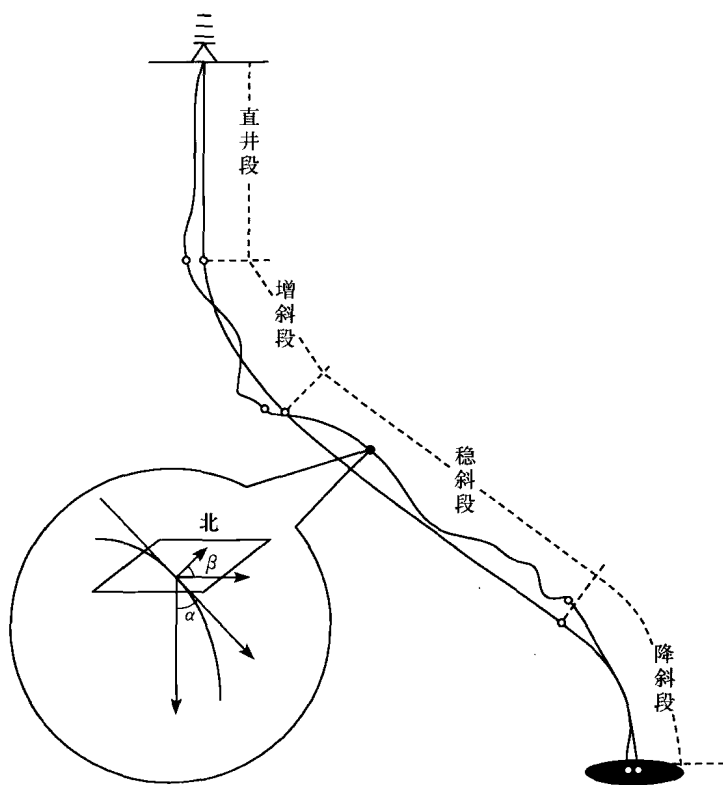


图 1.1 井眼轨迹和井斜参数示意图

## § 1.2 钻井系统动力学概述

钻井系统动力学就是研究钻机、钻柱、钻头、岩石、泥浆等在起下钻和正常钻进过程中的动力特性。钻井系统示意图如图 1.2 所示。

钻柱是钻头以上、水龙头以下部分的钢管柱的总称。钻柱是一条具有初始曲率和初始挠度的空间梁结构。它包括方钻杆、钻杆、钻铤、各种接头及稳定器等井下工具。钻柱是钻井的重要工具,是连通地下与地面的枢纽。在转盘钻井时,靠它来传递破碎岩石所需要的能量,给井底施加钻压,以及循环钻井液等。在井下动力钻井时,井下动力钻具是用钻柱送到井底并靠它来承受反扭矩,同时钻头和动力钻具所需的液体能量也是通过钻柱输送到井底。

钻头是破碎岩石的主要工具。随着钻井工艺的要求及钻井技术的发展,材料科学和机械制造工业的发展,钻头的设计、制造和使用技术有了很大的进步。这种进步体现在新技术在钻头上的充分及时地应用,钻头的品种和使用范围不断扩大,

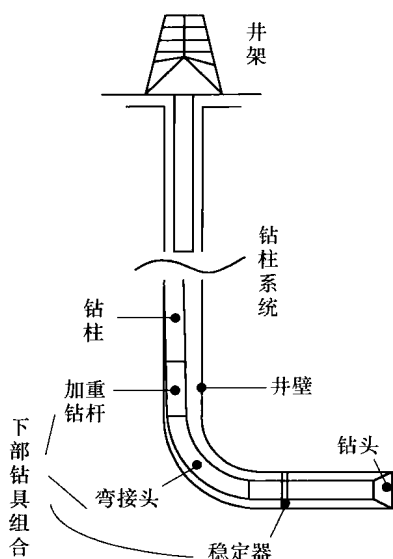


图 1.2 钻井系统示意图

钻头的技术及经济指标不断提高等方面。

综上所述,钻井系统动力学的研究包括钻柱力学、钻头与岩石互作用理论、井眼轨迹的预测和控制等多方面的研究。

### 1. 钻柱动力学

钻柱力学是石油钻井工程学科领域的重要理论基础,也是了解钻柱在井下工作机理的力学基础。开展井下钻柱的力学行为特征研究,是研究钻柱、钻头失效形式,优化钻井参数,预测井眼轨迹等方面的理论基础。

钻井界专家先后提出了钻柱力学分析的许多理论和方法。这些方法包括经典微分方程法、有限差分法、逆解法、纵横弯曲连续梁法、能量法、变分近似法、有限元法等,经历了从线性

分析到非线性分析,从静力学分析到动力学分析,从简单的井下钻具组合的力学分析到复杂的地质导向钻具的力学分析,从不考虑流体、地质不均匀性的影响到全面考虑流场耦合和接触非线性等因素影响的发展过程。本书着重阐述开展钻柱动力学研究的相关成果。

早期钻柱动力学分析结果与实际钻柱力学状态相差很远,这一时期的研究方法限制了钻柱动力学的研究范围。近代钻柱动力学研究一般被认为是从 20 世纪 80 年代开始。在这个时期,无论是外部条件(如相关学科的发展、测量手段的完善等)还是内部条件(如钻井界本身的需要)都已基本发展成熟,为钻柱动力学的研究提供了一个很好的研究基础。

20 世纪 80 年代初 Apostol<sup>[2]</sup>首先应用达朗贝尔原理,在静力分析的基础上,引入了惯性力和摩擦力,建立了对底部钻具组合(BHA)进行三维动力分析的有限元模型,考虑了钻头力、浮力、稳定器、井眼轨迹和横向振动模式。虽然没有考虑地层的影响,但认为地质条件很重要。Millheim 等是第一批较系统地对钻柱进行动力学研究的团体,虽然模型中的某些假设与实际情况并不完全相符,但却为以后的研究指明了方向。

Aarrestad<sup>[3]</sup>等对钻柱的振动进行了一系列的研究:分析了直井理论(线弹性)模型预测和全方位钻井装置的纵向振动测量数据;研究了钻柱的纵向和扭转振动在钻头处的耦合机理,并指出扭转振动是与旋转的钻头速度的动力变化相联系的,当牙轮钻头以多凸形式运动时,这些速度的变化会影响纵向振动的输入。Aarrestad 还指出频率带经常包含一个三倍于转速的主振频率,并证明了三牙轮钻头在

地层中已形成三凸形式运动;在频率带中还包含这个基频的较高阶谐振,它是扭转和轴向振动的非线性耦合。

Brakel 和 Azar<sup>[4]</sup>给出了 BHA 的瞬态动力有限元算法(不包括地质条件的影响),并用地层与钻头之间作用力的时间平均值来预测 BHA 的走向。在模型中使用了三维线性梁单元,并用 Wilson- $\theta$  法及 Gauss 消去法来求解动态有限元方程组,用 Newton-Raphson 迭代法来确定强加井壁约束引起的接触力的变化,并模拟上部钻柱的弹性响应,在 BHA 顶部节点上连接拉伸和扭转弹簧。

Jogi 等<sup>[5]</sup>将钻柱振动模型应用于现场后发现,钻柱振动在直井中比在斜井中严重,认为在斜井中稳定器的侧向力近似地随井斜的正弦增加,且在轴向和扭转振动上引起很大的摩擦阻尼,同时认为激振的振源是转速、钻头与岩层的相互作用、泥浆泵和稳定器,横向振动的共振频率主要取决于钻铤的尺寸和刚度、稳定器的位置等。

1990 年,Clayer 等<sup>[6]</sup>研究了地面系统和井底边界条件对三牙轮钻头及钻柱振动的影响。他们将钻柱与地面结构作为一个系统来研究,在模型中,地面结构被简化成质量-弹簧-阻尼系统,而井底的边界条件被简化为等效的弹簧和阻尼器。

Apostal 等<sup>[7]</sup>利用基于有限元法的力-频响应(FFR)法对 BHA 进行了瞬态振动分析,认为此模型可以应用于任意三维井眼的 BHA 分析,并且能确定由钻柱任何部分的力或位移激振所引起的钻柱的力-频响应。

Aarrestad 等取整体钻柱为研究对象,导出了满足受力条件的振动微分方程,用变形协调条件对天车和钻头两个端点的边界条件作了一定假设,得出如下结论:①钻柱的纵向和扭转振动的响应主要取决于沿钻柱分布的黏弹性阻尼和一些边界支撑常数,而这些黏弹性阻尼与振动频率有关;②钻柱钻进时,钻柱的扭转振动有一定的规律性;③扭转振动的频率基本上与转速、钻压、阻尼无关;④钻柱的扭转振动频率可由钻柱几何尺寸和物理参数计算出来;⑤钻柱的性质对扭振的低频响应相当敏感;⑥对扭转波而言,转盘可视为固定端,而钻头为自由端<sup>[8]</sup>。

1988 年,章扬烈等<sup>[9]</sup>通过在钻柱模拟实验装置上的实验,提出了以反转运动为主要特征的旋转钻柱运动原理,分析了钻柱的受力和变形,提出了广义传递矩阵法求解钻柱的受迫振动。

署恒木等<sup>[10,11]</sup>建立了 BHA 的动态有限元方程,得出井眼的扩大对增斜钻具的井斜力和方位力影响很大,对稳斜和降斜钻具的影响不大;摩擦系数和转速对方位力的影响较大,对井斜力的影响较小。

陈浩和陈祖锡<sup>[12]</sup>在分析 BHA 三维静态受力和变形的基础上,利用 ADINA 程序进行了动力响应分析。在模型中主要考虑的是钻柱的旋转运动,其他方向的运动被忽略。钻柱的动态分析比静态分析更精确,但其平均值与相同受力状态下使用“纵横弯曲连续梁理论”的静态结构较为接近。



刘延强等<sup>[13]</sup>建立了钻柱与井壁动态摩擦接触的有限元模形,考虑了钻柱与井壁之间的完全撞击和连续接触的情况,假定钻柱上某点与井壁接触时,该点沿井壁只有滚动而无滑动,并用接触前后速度的平均值表示该瞬时的速度,用改进的Wilson- $\theta$ 法和静态模式求解动态响应。

高德利<sup>[14]</sup>依据动力学的普遍原理,采用微元矢量分析方法建立了钻柱的一般平衡方程,导出了不可伸长弹性钻柱变形的一般动态控制方程,并且对钻柱下部组合的静力分析方法及钻柱摩阻分析方法进行了讨论,对钻柱弹性稳定性问题也进行了初步探讨,给出了钻柱研究的基本方程。

张光伟<sup>[15]</sup>在考虑钻柱外钻井液的影响下,为了建立钻柱横向振动的微分方程,将钻井液假设为不可压缩的理想流体,暂不考虑钻柱内部的钻井液,并将钻柱外部的钻井液视为静止,对碰撞力采用非线性弹簧和非线性阻尼器来描述,在钻柱上取微元进行受力分析,建立钻柱横向振动的微分方程。

梁政等<sup>[16]</sup>认为,在深井测试过程中,测试管柱除了承受拉压弯及气液流的静压或冲击载荷外,往往还伴随着振动,致使密封管脱出封隔器密封腔,损坏套管、封隔器、测试阀及井口设备等。在综合考虑影响测试管柱横向振动各种因素的同时,通过对测试管柱各种基本载荷分析,应用达朗贝尔原理,建立测试管柱受压段固液涡动振动微分方程,利用三角级数法导出频率计算的精确公式,得出管柱振动频率不仅与其力学特性有关,而且与管柱的轴向载荷、管内外流体密度及管柱几何尺寸等相关的结论。

韩致信等<sup>[17]</sup>提出钻柱纵向共振危害最严重:①纵向共振会使钻头产生脉冲跳动,而钻头的脉冲跳动一方面会使钻速降低,另一方面会导致钻头和井底岩石之间产生脉冲性冲击,造成钻头轴承和镶齿的过早失效;②纵向共振是钻杆和钻铤在螺纹联结处发生疲劳断裂的主要原因之一;③纵向共振可引起方钻杆在转盘内猛烈跳动,造成死绳大幅度晃动,进而引起绞车及其传动系统和井架的脉冲性振动。

高宝奎等<sup>[18]</sup>从钻柱耦合振动时各截面的应力变化规律出发,运用金属非比例循环概念及特性,评论了双轴非比例循环对钻柱疲劳的影响。

吴天新等<sup>[19]</sup>讨论了钻柱内外轴向流动的钻井液对钻柱横振的影响,并引入附加质量系数来描述在钻柱与井壁之间的环空中向上流动的钻井液对钻柱振动的影响。冯军刚等<sup>[20]</sup>推导了考虑钻井液流动影响的钻柱横向振动的微分方程,将流体的绝对加速度看成由牵连加速度、流体相对钻柱的法向加速度、科氏加速度组成,并用拉普拉斯变换原理中的有理分式反演法、位移定理、卷积定理等求解了该微分方程,给出了考虑钻井液流动影响的多稳定器钻柱横向振动的频率方程和振型函数的精确解析式。

文献[21]~[25]中通过仿真实验,系统研究了钻柱、钻头以及岩石系统之间的动态行为,认为引起钻柱振动的因素主要有钻头与岩石相互作用、钻柱的弯曲变