



海洋石油钻井 工程力学研究与实践

姜伟◎著

STUDY AND PRACTICE IN
ENGINEERING MECHANICS
OF OFFSHORE PETROLEUM DRILLING

石油工业出版社

海洋石油钻井工程力学研究与实践

**Study and Practice in Engineering
Mechanics of Offshore Petroleum Drilling**

姜 伟 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对海洋石油钻井工程中的自升式钻井平台、海洋石油钻井隔水导管、钻柱的力学行为和力学特性进行了研究和分析,这些研究成果都在实践中得到了应用和验证,对于在海上钻井作业保证安全、提高效率,起到了重要的帮助和指导作用。

本书结合“十五”期间国家 863 科研成果的部分研究内容及其成果,以及在海洋石油钻井工程力学研究方面的一些最新进展情况,理论联系实际,用海洋石油钻井工程力学的观点,较为系统的研究了海洋石油钻井工程中的力学问题,同时,在应用过程中使理论研究工作逐步形成了自主创新的技术体系。

本书可供从事海洋石油钻井工程的技术人员和石油院校相关专业的师生阅读和自学之用。

图书在版编目(CIP)数据

海洋石油钻井工程力学研究与实践/姜伟著.

北京:石油工业出版社,2008. 12

ISBN 978 - 7 - 5021 - 6943 - 5

I. 海...

II. 姜...

Ⅲ. 海上油气田-海上钻进-工程力学

IV. TE52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 200541 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: [www. petropub. com. cn](http://www.petropub.com.cn)

编辑部:(010)64523583 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

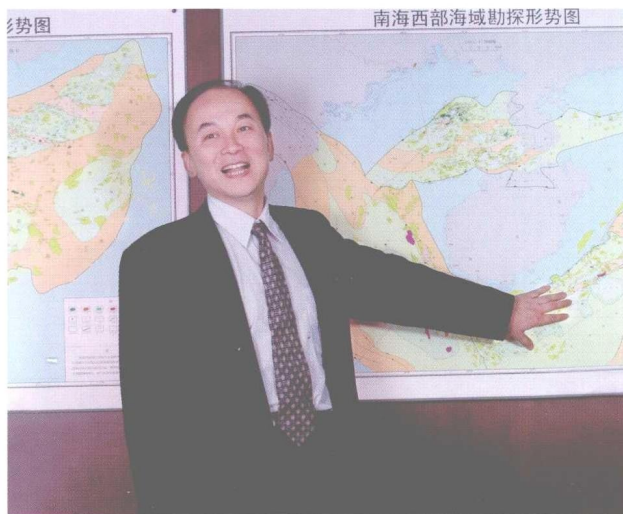
787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:14.25

字数:365 千字

定价: 65.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究



作者简介

姜伟,1955年生,河北宁晋人,1982年毕业于西南石油学院钻井工程专业,毕业后分配到海洋石油渤海公司工作,有十三年海上钻井监督工作经验,长期从事技术研究和技術管理工作。组织、开展了渤海油田优快钻完井的工作,以及渤海油田大位移井钻井工作,国家科技部863研究课题中有关海洋钻完井技术研究课题的工作。

历任海洋石油渤海公司钻井部主任工程师,渤海公司钻井总工程师,中海油有限公司天津分公司副总经理,中海油研究中心副主任、钻完井总工程师等职务。

2000年被评为享受国务院特殊津贴专家,曾在国家“九五”、“十五”期间,任国家科技部863研究课题中钻井工程方面科研课题负责人,获得国家科技进步二等奖1项和部级科技进步奖13项,在《天然气工业》、《石油钻采工艺》、SPE等国内外公开发行的学术刊物上发表论文130多篇,获得技术专利19项。

前 言

中国海洋石油总公司(后简称中国海油)从引进、消化、吸收国外海洋石油工业先进技术开始,经过 20 多年的拼搏,已经在中国石油工业领域里迅速的成长和壮大,并已成为中国经济高速发展的重要力量。近年来,中国海油自觉的贯彻落实科学发展观,致力于国际一流能源公司的建设,实现了高效和高速的发展,已成功实现了三个跨越:产业结构上从上游到中下游一体化的跨越;发展能力从浅水到深水的跨越;市场规范从国内到国际的跨越。逐步摸索和成功的探索出了一条具有中国海油特色的企业科学发展之路。

在中国海油的发展过程中,海洋石油钻井工程是中国海油在海上油田勘探和开发过程中必不可少的重要手段和技术之一。在海洋石油钻井技术中,我们要追求安全、高效率的发展,要实现优质、快速的钻井作业模式,这就要求我们不但要有认真客观的务实精神,认真学习和实践国外先进的钻井技术和基础理论,同时还要在实践中根据中国海油的实际情况予以总结和再认识。海洋石油钻井工程是一门集海洋工程特点与钻井工艺相结合的学科和技术,由于我们在海洋石油领域起步较晚,因此我们在理论和实践方面,需要一方面努力学习和掌握世界先进技术,同时另外一方面需要在实践中善于发现问题和研究并解决问题。

中国海油的优快钻完井是中国海油在钻完井技术取得突破性进步的标志之一,它的成功之处在于学习国外先进技术集成八大钻井技术的同时,还创新了四大技术,平均钻井效率提高了 2.8 倍,在渤海油田开发中,取得了显著的经济效益。这些技术成果是广大工程技术人员发扬了工作中的团队精神,弘扬科技工作中的攻关精神,理论结合实际,并在实际工程中应用和推广条件下取得的。

本书主要内容是根据海洋石油钻井过程中,涉及到安全、作业效率和成本等大家最为关注,也是经常要遇到和需要处理的钻井工程问题展开的:自升式钻井平台的振动特性及其对钻井作业的影响;海上钻井隔水导管的临界载荷;单桩稳定性及其使用特性与钻井作业的特点;海上钻井工程中常遇到的钻柱力学问题及其钻柱的动力学问题在研究以及在工程中的应用问题。同时本书也反映了近年来膨胀管技术在海上优快钻井技术中的创新和应用。本书的主要内容贯穿海上石油钻井工程中的力学问题,及其对海上钻井工程所起到的积极作用,中国海油的钻井工程正在逐步形成自己独特的技术体系。

海油石油钻井工程集中体现和代表了当今人类在海洋石油天然气勘探领域里的先进技术,它涉及的内容很多,面也很广,是集多学科的一个载体,同时又是需要理论联系实际的一门实践性很强的学科。

改革开放以来,中国海油走过了一个蓬勃发展、科学发展的历史阶段。在这个过程中,我们在学习国外先进技术的同时,也开阔了自己的视野,并且根据中国海油的现状和发展需求,在学习与创新海洋钻井工程技术方面,取得了长足的进步和发展。广大科技人员在这过程中,用他们的辛勤劳动,和我们一道共同见证了中国海洋石油钻井工程技术的发展和进步。

为了实现中国海油建设国际一流能源公司的战略目标,为了实现中国海油在“十一五”期间的三个跨越,我们在建设中国海油创新技术体系的过程中,还要进一步的在自主创新、积极探索的道路上继续深入研究,解决制约中国海油钻井工程发展的技术瓶颈问题,力求在理论研究和生产实践中,善于探索,勇于实践,在科学发展和学习国外先进技术的同时,注重自主创新,为中国海油在2010年实现5500万立方米油气当量的战略目标的实现,为国家“十一五”期间国民经济的发展,做出应有的贡献。

在中国海洋石油高速、高效发展的今天,我们的海洋石油钻井技术,正随着中国海油走向海外,走向深水,正在向新的技术和领域进军。面对新的挑战,中国海油的广大科技人员正在以崭新的姿态,在努力学习和掌握国际先进技术的同时,求实创新,深入钻研,逐步建立和形成中国海油特色的自主创新技术体系。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 海洋石油钻井工程面临的困难和挑战	(1)
1.2 海洋石油钻井工程需要研究的有关内容	(1)
1.3 研究内容与实际工作的意义	(2)
参考文献	(3)
2 自升式钻井平台	(5)
2.1 自升式钻井平台横向水平自由振动	(5)
2.2 悬臂式钻井装置在钻井作业状态下的横向振动	(19)
2.3 悬臂式钻井装置振动特性对开窗作业的影响	(25)
2.4 悬臂式钻井装置荷载特性对钻井设计和施工的影响	(30)
2.5 导向钻井技术在悬臂式钻井平台的应用	(35)
参考文献	(39)
3 海上钻井隔水导管	(40)
3.1 海上钻井隔水导管对水面以上保留井口的安全问题	(40)
3.2 隔水导管单桩的稳定性及其设计方法的改进	(46)
3.3 钻井隔水导管临界屈曲载荷及稳定性研究	(54)
3.4 海上钻井变刚度隔水导管临界屈曲载荷及稳定性	(57)
3.5 钻井隔水管的横向振动	(62)
3.6 海上深水钻井隔水导管振动特性研究及其应用	(70)
3.7 深水钻井隔水管一端自由无约束条件下的挠曲方程及固有频率的计算 及其研究	(75)
参考文献	(87)
4 钻井管柱力学	(88)
4.1 钻柱纵横弯曲研究及其应用	(88)
4.2 定向井多稳定器钻具组合受力分析和计算	(96)
4.3 水平井下部钻具组合挠曲变形的级数方程	(101)
4.4 水平井及大斜度井下部钻具组合的弹性稳定性	(108)
4.5 水平井变刚度下部钻具组合的弹性稳定性	(114)
4.6 常用稳斜钻具组合特性分析	(124)

4.7 能量法在旋转导向偏心稳定器芯轴设计中的研究与应用	(129)
参考文献	(135)
5 钻井管柱动力学	(136)
5.1 定向井加重钻杆的横向振动	(136)
5.2 下部钻具组合中的横向振动	(144)
5.3 旋转钻柱动载扭矩的研究及其应用	(149)
5.4 MWD 工具与钻井液耦联振动研究	(156)
5.5 海上套管钻井管柱动应力的研究及其计算方法	(161)
参考文献	(168)
6 海洋石油钻井工程力学研究及应用的新进展	(169)
6.1 膨胀锥体的理论特性研究	(169)
6.2 膨胀衬管弹塑性力学特性及极限工况研究与应用	(178)
6.3 膨胀管坐挂分支井技术研究及其在渤海油田调整增产中的应用	(184)
6.4 表层固井装置的研究及其应用	(192)
6.5 表层套管固井装置动力响应研究	(199)
6.6 渤海油田海上沉箱集中快钻密集丛式井表层技术	(207)
6.7 渤海油田丛式井集中快速钻表层技术	(211)
参考文献	(215)

Contents

1	Introduction	(1)
1.1	The challenges in offshore drilling	(1)
1.2	The required contents of study in offshore drilling	(1)
1.3	The study contents and its significance	(2)
	References	(3)
2	Offshore Jack – up Drilling Rig	(5)
2.1	Lateral free vibration of jack – up drilling rig	(5)
2.2	The horizontal vibration of cantilever drilling rig in the process of drilling operation	(19)
2.3	The influence on casing side tracking operation by vibration of cantilever drilling rig	(25)
2.4	The influence of loading character of the cantilever drilling rig on the drilling design and operation	(30)
2.5	Application of steering drilling technology on the cantilever drilling rig	(35)
	References	(39)
3	Offshore Drilling Conductor and Riser	(40)
3.1	Safety assessment of offshore drilling conductor for retained wellhead above seawater leave	(40)
3.2	The stability study and design method of drilling conductor	(46)
3.3	The Buckling Load and stability of drilling conductor	(54)
3.4	The buckling load and stability study of variable stiffness structure conductor in offshore drilling	(57)
3.5	The horizontal vibration of drilling riser	(62)
3.6	Study on the vibration characters of deepwater drilling riser and its application	(70)
3.7	Study on deflection equation and natural frequency of deepwater drilling riser	(75)
	References	(87)
4	Mechanical Characters of Drilling String	(88)
4.1	Study on vertical and horizontal bending of drilling string	(88)
4.2	Mechanical analysis and calculation of bottom hole assembly with multi – stabilizer	

in directional drilling	(96)
4.3 Deformation of deflection series equation of bottom hole assembly in horizontal drilling	(101)
4.4 Elastic stability of bottom hole assembly in horizontal and high angle drilling	(108)
4.5 Elastic stability of variable – stiffness bottom hole assembly in horizontal drilling	(114)
4.6 Characteristic analysis of conventional angle holding bottom hole assembly of directional drilling	(124)
4.7 Study and application of energy method for design of shaft of rotary steerable eccentric stabilizer	(129)
References	(135)
5 Dynamical Analysis of Drilling String	(136)
5.1 The horizontal vibration of heavy weight drilling pipe in directional drilling	(136)
5.2 The horizontal vibration of bottom hole assembly	(144)
5.3 Research and application of dynamic torque of rotary drilling string	(149)
5.4 Study on coupled vibration of MWD drilling tool – drilling fluid	(156)
5.5 Study and calculating method of dynamic stress of casing drilling string	(161)
References	(168)
6 New Developments of Researches and Applications of Drilling Mechanics in Offshore Petroleum Drilling	(169)
6.1 Theoretical study on expanding cone body	(169)
6.2 Study on elastoplastic mechanical performance and critical situation and its application	(178)
6.3 Application of a new technique of expandable tubular setting tool for branch well in Bohai oilfield	(184)
6.4 The study and application of surface cementing unit	(192)
6.5 Study on dynamic response of offshore surface casing cementing unit	(199)
6.6 Intensive and rapid near – surface drilling technique using caisson method for dense cluster wells in Bohai oilfield	(207)
6.7 Intensive and rapid near – surface drilling technique for dense cluster wells on wellhead platform in Bohai oilfield	(211)
References	(215)

1 绪 论

1.1 海洋石油钻井工程面临的困难和挑战

我国的海洋石油工业起步于 20 世纪 60 年代初期,1960 年 4 月^[1],我国的石油工作者在南海地区进行了美冲 1 井和美冲 2 井的钻探工作,两口井均见到了油气显示。然后,在南海和渤海地区展开了中国海上找油找气的一系列工作,从此中国开始了自己的海上油气勘探和开发的历程。

海上作业与陆地作业相比,从表面上看仅仅多了一层海水,但因为这一层海水使海上钻井工程面临很大困难和挑战。海上钻井装备与陆地的钻井装备有很大不同,在海上需采用自升式钻井平台、半潜式钻井平台、钻井船等浮式钻井装置,可用于不同的作业水深,同时钻井作业机具要求适应和满足海上作业高风险高投入的要求和特点。

海上作业对各种装备和工具的作业效率要求高,而且还要求具备很高的安全操作性能,以满足海上作业高效、安全、环保的要求^[2~5]。针对海上作业特点的各主要作业环节以及各主要作业程序中,对装备和工具强调的是技术要能满足作业安全、高效。正如中国海油的发展历程中,在渤海地区开展的优快钻井工作,不但效率比以前提高了 2~3 倍^[6~7],同时在安全生产管理方面,也创造了最好的纪录。

在海上钻井作业过程中,除考虑井眼中的问题,还要考虑与海洋有关的问题,如钻井平台、钻井用隔水导管、钻井平台上海事方面的特殊设备。这些问题都是我们在海上作业中每天都要遇到和要考虑的问题,同时这些机具对于海洋石油钻井工程而言,又都是必不可少的,因此,我们在海上钻井经常遇到的挑战就是:如何在工作中根据海洋作业的要求和特点,正确的理解和执行每个操作过程;确保设备安全、人的生命安全和环境安全;合理科学地利用自然规律和人类对海洋的认识,顺利在海上开展油气勘探工作。

海洋石油钻井工程需要了解和掌握的知识很多,主要包括两大类:一是我们钻井工程本身的专业知识;二是与海洋有关的海上作业及其相关的专业知识。海洋与钻井工程的结合和融合,形成了海洋石油钻井工程技术的特点。在这里面有许多相关知识和新的知识,对我们而言既充满趣味,又充满挑战,既需要我们积极探索,更需要我们勇于实践。

1.2 海洋石油钻井工程需要研究的有关内容

海洋石油钻井工程作为一门学科,有它专业的特殊性,因此在研究海洋石油钻井工程中的问题时,我们要突出重点、抓住关键。在整个海洋钻井工程中,应开展结合海洋特点的关键内容的研究,把制约钻井作业安全和效率的问题作为重点进行研究,以解决日常钻井工程中最常见和亟待解决的一些问题,同时也为现场的工程技术人员提供必要的技术支持和作业帮助。

本书主要围绕海洋石油钻井工程技术人员经常要遇到的和经常面对的问题开展一些实用技术研究,帮助他们在日常工作中正确合理的选择和设计作业参数。围绕海上作业的安全和高效作业的特点,重点在海上钻井的相关知识和钻井工程本身这两个方面开展研究。

在海上钻井工程相关知识部分,我们重点研究与钻井作业相关最大的自升式钻井平台和悬臂式钻井平台。自升式钻井平台对钻井作业影响表现在横向振动引起的就位精度及其对钻井作业的影响。而悬臂式钻井平台具有井口移动范围大,可以在一个升船位置覆盖多口井的特点而广泛应用,但是它的载荷特性和臂梁本身的振动特性对钻井作业会产生影响,本书对此问题也进行了研究。

在海上高效安全作业的控制和管理进程中,优快钻井要求不但钻井效率要高^[8,9],同时还应尽可能减少非生产时间及井下复杂情况。因此,钻柱和井下工具的安全就显得十分重要。这就需要对钻柱力学性能及其力学特点开展研究工作,关注管柱及其安全问题。国内外有许多专家和学者已经对旋转钻井的力学性质及钻井力学行为做了大量的研究工作^[10~20],对于钻柱在钻井作业状态下的力学性质进行了许多开创性的研究^[21]。但是随着海上优快钻井工作的开展,特别是一些特殊的钻井作业,如定向井、丛式井、大位移井、水平井技术的研究、应用和开展^[22~25],使我们认识到研究钻井管柱力学在保证井的安全,提高作业效率方面意义重大。因此这是海上石油钻井工程应该研究的重要内容之一。

除传统管柱力学所关心和研究的问题以外,还有一些问题需要我们在实践中去探索和思考,这些问题集中反映在钻柱振动引起的钻柱早期磨损,严重时甚至危及到钻具井下工作的安全,这一问题在渤海SZ36-1油田开发中曾经一度十分严重。在探井中我们发现在这样状态下钻柱的强度不能完全适应恶劣工况的要求,出现了钻具扭断的事故,这些问题均反映出我们在实际钻井工作中尚不能完全按照理想的钻井条件进行。因此需要开展对于保证钻井安全工作的钻柱力学性能的研究工作。

综上所述,我们对海洋石油钻井工程中出现的力学问题开展的研究,主要是基于海上钻井工程的需要和优快钻井作业的需要,研究内容完全是出自实际工作的需求,也就基本上反映了海洋石油钻井工程中所遇到的主要力学问题,因此,结合实际需求,力争解决实际问题就是本书的最大特点和笔者的心愿。

1.3 研究内容与实际工作的意义

需要什么,研究什么,这是我们研究和解决问题的主要思路。本书把海上钻井作业中遇到的涉及作业安全和钻井效率的问题作为重点研究,并归纳为三大类问题:

第一类问题:海上丛式井常用的井眼轨迹控制及其钻具弹性稳定性分析^[26,27],这类问题主要解决钻柱的安全使用以及钻井参数的合理选配。针对海上定向井、丛式井以及水平井的特点,大多在钻具组合中采用多稳定器组合,为了准确而又有效的控制井眼轨迹精确钻达设计的靶区和储层,对于钻具组合的性能及其钻头侧向力等进行了研究和分析。采用的是纵横弯曲连续梁的方法求解钻柱中的钻头侧向力问题,其主要目的在于解决定向井、丛式井中的钻井参数合理选择,进一步提高机械钻速,达到满足海洋石油钻井工作实际需求。

第二类问题:海上钻井用隔水导管及海上自升式平台钻井作业的一些有关问题。我们如何根据隔水导管自身的特点,合理选择作业状态和边界条件。隔水导管是海上钻井作业的先

1 绪 论

决条件,是海上钻井作业的第一道重要环节,是钻井作业中要下入的第一层管柱,并且在后期钻井作业中一直起到提供循环通道、支撑井口防喷器、提供油气井经井下到海面通道的作用,隔水导管自身的安全和经济性对钻井作业有很大影响。隔水导管与钻柱的摩擦问题十分普遍;隔水导管在海流以及自身固有频率作用下的谐振问题在现场经常可以观察到;同时在紧急情况下,钻井平台在撤离井位时独立单桩的隔水导管弹性稳定性关系到井的安全和费用。对于这些实际的问题的研究,大多采用了杆柱的振动频率研究方法,以及杆柱的弹性稳定性研究方法^[28~30],开展钻柱套管之间谐振问题的研究,采用和选配合理的钻井参数,以期达到在钻井作业过程中保护套管不致产生过度磨损。

与钻井作业关系最大的就是自升式钻井平台由于水平方向受到环境力作用条件下发生的横向振动,其振动和固有频率对钻井作业的影响,特别是振幅对于就位精度测量的影响、对井口产生的位移的影响以及对隔水导管自振频率的影响等;对于悬臂式钻井平台,由于其悬臂梁的特点,不同条件对钻井作业产生不同的影响,特别是由于悬臂梁本身就有振动特性,因此,它对于开窗侧钻、钻深井等条件下,钻头长期处于同一位置深度,同时在转速频率下工作,对井下工具、套管都会产生由于振动而带来磨损的影响^[31~32]。这类问题所采用的主要方法是研究受力杆件的横向振动,采用瑞雷法和里茨法,对于振动,首先选择合适的挠度曲线,然后用能量守恒的方法,求其振动频率。这类问题的研究和应用,有效地解决了渤海地区钻井作业中遇到的实际问题,提高了作业效率,减少由于钻井平台悬臂梁的振动造成的对于钻井作业的不利影响。

第三类问题:由于渤海地区优快钻井进程中反映出的一些工程实际问题 and 新技术探索。这些问题主要在于钻柱的合理使用方面。随着优快钻井工作的开展,在渤海地区机械钻速的普遍提高。以 SZ36-1 油田为例,总的钻井效率从 1998 年到 2002 年提高了 2.8 倍。钻井速度的大幅提高,同时也必然带来了一些过去常规钻井方法所不曾遇到过的问题。如在该地区普遍存在如重钻杆的过度磨损问题^[33],以及下部钻具组合中的横向振动问题^[34,35]都反映在优快钻井作业过程中。为了确保优快钻井的顺利开展,面对我们遇到的钻柱的安全使用问题,我们通过采用钻柱力学的研究方法,建立了在横向均布载荷与轴向载荷条件下的钻柱纵横弯曲的挠曲方程,采用了里茨(Ritz)的方法分析连续系统的振动问题,求解横向自由振动时的基数和高谐固有频率,从中解出了前三阶横向共振的固有频率,从而分析了在常用转速和钻柱条件下发生共振的转速范围,找到了发生横向共振的内在规律和原因。

另外,在钻井进程中出现的钻井工具的井下事故,通过对实际操作情况的研究和分析,我们认为现有的规范中还有需要进一步完善的地方,特别是当钻柱在旋转状态下承受的扭矩和钻压作用,其动态应力特征与静态相比有很大不同,并会对钻井作业带来很大的影响。通过对这些实际问题的研究,进一步提高了我们海上钻井作业的科学性和安全性,从而也为海洋石油钻井工程提高钻井效率、降低作业成本,促进优快钻井工作的开展,起到了积极的推动作用。

参 考 文 献

- [1] 中国石油钻井编辑委员会. 中国石油钻井(中国石化、中国海油卷). 北京:石油工业出版社,2007.
- [2] Sub sea Blowout Presenters and Marine Riser Systems Petroleum Extensions Service. The University of Texas at Austin. Houston. Texas, 1976.

- [3] Jacking Systems and Rig Moving Procedure. Petroleum Extension service. The University of Texas at Austin. IADC. Houston. Texas, 1976
- [4] Spread Mooring Systems Petroleum Extension Service. The University of Texas at Austin. IADC. Houston. Texas, 1976
- [5] The Rotary Rig and Its Components Petroleum Extension Service The University of Texas at Austin. IADC. Houston. Texas, 1976
- [6] Jiang Wei. High Quality and High Speed Drilling Applied in Bohai. SPE 50881, 1988.
- [7] Jiang Wei. The Application of Modern High Quality and High Speed Drilling Technology in SZ36 - 1 Oil field Development of phase II in Bohai SPE64615 2000. Nov.
- [8] 姜伟. 现代综合配套快速钻井技术在渤海的应用. 天然气工业, 1998, 18(1).
- [9] 姜伟. 现代优快钻井技术在渤海油田开发中的应用. 中国海上油气, 2002, 14(6)
- [10] 赵国珍, 龚伟安. 钻井力学基础. 北京: 石油工业出版社, 1980.
- [11] walken. B. H. Downhole Assembly Design Increases ROP, Cut Cost. World Oil, 1977.
- [12] Millheim KK. Behavior of Multiple Stabilizer Bottom hole Assemblies. OEJ, 1979.
- [13] Millheim KK and Apostol MG. How BHA Dynamics Affect Bit Trajectory. World Oil. 1981.
- [14] Millheim KK Apostol MG. the Effect of Bottom hole Assembly Dynamics on the trajectory of a Bit. SPE 9222.
- [15] 白家址, 苏义脑. 井斜控制理论的实践. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [16] 白家址. 应用纵横弯曲连续梁理论求解钻具组合受力与变形//国际石油工程会议全文论文集. 北京, 1982.
- [17] 施太和. 下部钻柱性能的计算机模拟. 西南石油学院学报, 1983(3).
- [18] 高德利, 刘希圣. 典型地层的各向异性钻井特性. 石油大学学报(自然科学版), 1990.
- [19] 高德利, 徐秉业. 弹性钻柱运动的基本方程问题//中国博士后论文集第四集. 北京: 北京大学出版社, 1991.
- [20] 高德利. 典型导向钻具组合的力学分析方法. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(B).
- [21] American Petroleum Institute. API Recommended Practice for Drilling Stem Design and Operation Limits API RP 7G Tenth Edition. Washington DC. 1987
- [22] 张武攀. 我国第一口刘老界大位移井—西江 24 - 3 - A14 井总结. 石油钻井工艺, 1998, 20 卷(增刊).
- [23] 姜伟. 大位移钻井技术在渤海 QK17 - 2 油田开发中的应用. 石油钻采工艺, 2000, 22(3).
- [24] 姜伟. 大位移钻井技术研究与应. 中国海上油气(工程), 2001, 12(6).
- [25] 姜伟. 大位移钻井技术在渤海 QHD32 - 6 油田应用. 石油钻采工艺, 2001, 23(4).
- [26] 姜伟. 水平中下部钻具组合挠曲变形的级数方程. 石油机械, 1993, 21(12).
- [27] 姜伟. 水平中变刚度下部钻具的弹性稳定性. 石油机械, 1998, 26(2).
- [28] 姜伟. 变刚度组合套管弯曲变形分析. 石油机械, 1997, 25(9).
- [29] 姜伟. 隔水管临界载荷及其弹性稳定性研究. 中国海上油气(工程), 2006, 18(6).
- [30] 姜伟. 渤海地区套管磨损问题的研究. 中国海上油气(工程), 2002, 12(1).
- [31] 姜伟. 表层套管开窗工艺在辽东湾 SZ36 - 1 油田的应用. 石油钻采工艺, 1993, 15(4).
- [32] 姜伟. 悬臂式钻井装置在钻井作业状态下横向振动研究. 中国海上油气(工程), 1993, 5(3).
- [33] 姜伟, 王兰. 定向井加重钻杆的横向振动的开发. 中国海上油气(工程), 1991, 3(5).
- [34] 姜伟. 下部钻具组合中横向振动研究. 中国海上油气(工程), 1991, 4(6).
- [35] 龚伟安. 钻柱固有频率的计算理论. 石油钻采技术, 1983(2).

2 自升式钻井平台

在海上进行钻井作业时,使用最多的钻井装置就是自升式钻井平台。自升式钻井平台在渤海湾地区应用已有 30 多年的历史,为我国海洋石油勘探与开发立下了卓越的功绩,并且与海洋石油钻井工程的进步与发展有着密不可分的关系。

自升式钻井平台自 20 世纪 50 年代中期以后迅速得到发展,其工作水深在 20 ~ 150m 之间,其中大部分自升式钻井平台工作水深在 100m 左右。我国早期的自升式钻井平台始于 1953 年,在渤海湾最早用于渤海钻井的自升式钻井平台是始于 20 世纪 70 年代,我国第一座自升式钻井平台——渤海 1 号于 1973 年 3 月出海钻井。迄今为止自升式钻井平台仍然是中国海洋石油总公司在海上作业的主要钻井装置。

自升式钻井平台具有三大特点:(1)具有足够大的甲板面积和舱室容积,足以摆放和容纳钻井作业所需要的钻具、管材、工具、散装材料及其相关的钻井装备;(2)钻井平台具有位移的功能,可以十分方便的采用拖航的方法从一个井位移动到另外的新井位;(3)具有升降船的功能,可以十分方便的实现拖航前的降船,钻井作业前升船的功能。

由于海上钻井的投资和费用很高,因此利用自升式钻井平台钻开发井时要求自升式钻井平台在就位以后,井架可以移动而覆盖多个井眼位置上进行作业。这就是悬臂式钻井装置得以在海上油田勘探开发中大量应用的原因。20 世纪 90 年代以后,渤海地区的钻井平台已经大部分采用悬臂式钻井装置作为主要的钻井装置,悬臂式钻井装置在渤海油田开发中发挥了重要的作用,并且创造了渤海优快钻井的优秀成绩。

利用悬臂式钻井装置,人们希望能够在一次升船位置上,钻机不仅要能覆盖更多的井口,同时钻机具有更高的负荷能力,能钻更多的深井和复杂井。实践表明:在钻机覆盖的不同的井口位置上,悬臂式钻井平台具有不同的负荷特点,对于钻井作业将会产生不同的影响。了解悬臂式钻井平台的这些特点,对于我们安全作业和高效作业有着十分重要的意义。

2.1 自升式钻井平台横向水平自由振动

2.1.1 钻井平台横向水平自由振动研究的意义

自升式钻井平台是近海海上钻井作业主要特殊工程船舶。自升式钻井平台在海上担负着不同的勘探开发任务,同时不同的海域和海洋环境条件下,作业水深各有不同,自升式钻井平台的工作特性和自身的特性也会对钻井作业带来影响。笔者在长期的海上钻井工作中发现:虽然我们对于钻井平台的振动特性已经有所了解和研究^[1,2],然而,随着我们在海上钻井工作量的增大,对于钻井作业也提出了也越来越严格的要求。如钻井平台在海上的井口平台就位时,由于希望在一次升船位置上能钻更多的井,因此要求就位精度越来越高,作业者希望在设计的范围之内就位升船,要求精度越高越好。但是实际上由于现场受实际情况和条件限制很难做到完全达到设计要求。

根据多年在海上钻井平台就位作业的实际情况发现:在钻井平台就位时,虽然已经充分考虑到了天气、海况、拖轮及拖缆等多种因素的配合和约束等条件,但是观察在升船以后的就位精度就会发现,就位仍然存在一定程度的精度误差。特别是对中转盘井口时发现误差尤为明显。这个问题原因何在呢?

同时,我们在海上作业过程中还发现:在钻井平台的井口小平台装置与隔水导管之间的 $\phi 60\text{mm}$ 顶丝给顶坏或剪断,这些问题又是什么原因呢?

笔者根据多年的海上平台精确就位作业经验发现:即使采用水下应答器这样的仪器和装置就位,就位时对中情况很好,但升船以后复测平台就位精度发现仍然会有误差,其原因是什么呢?

由此看来,开展对于本问题的研究特别是开展与钻井平台自身的振动特性的有关研究,对于海上石油钻井工作的顺利开展是十分重要和必要的。

2.1.2 自升式平台横向振动方程模型

海上自升式钻井平台在海上就位时,就是采用液压或机械的方法,将桩腿插入海底,然后再将平台的船体升举离开水面,同时在这一过程中,随着桩腿不断地往海底插入,平台的船体也就离水面越来越高,直到升至设计的气隙。此时自升式钻井平台船体底部距平台高度为 L ,桩腿再用设计的载荷进行压载使每根桩腿都插入到预定的人泥深度 L_1 ,或是达到压载的载荷。为简化研究问题,我们且不考虑波浪流对桩腿的作用,因此我们可以得到此时钻井平台就位以后的站立情形,如图2-1-1所示。

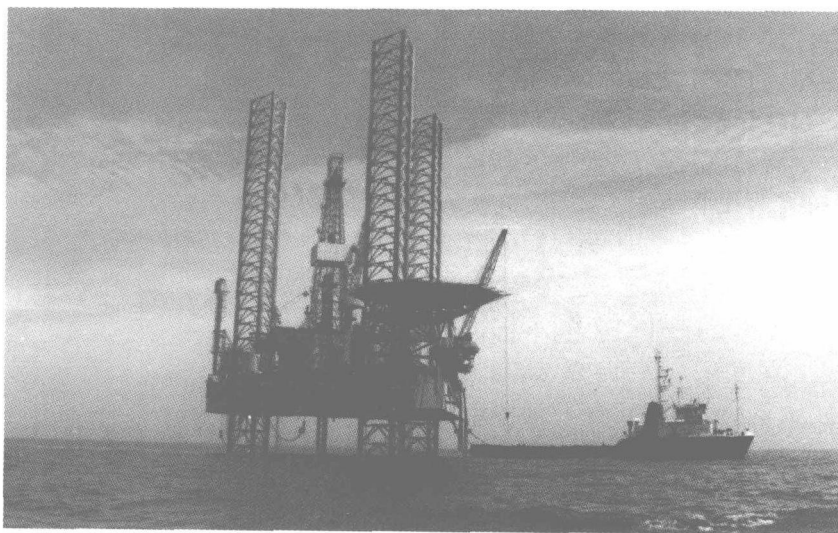


图2-1-1 自升式钻井平台在海上钻井作业

海上自升式钻井平台在升船压载后即进入作业状态,此时桩腿插入海底表面一定的深度后,由于海底的作用反力支持了钻井平台的重量 W ,钻井平台升船高度为海底泥面至钻井平台的距离 L ,此时平台还受到空气中气流和风载 P 的作用,其状态如图2-1-2所示。

在图2-1-2中,考虑到我们的桩腿大多是桁架或者圆筒柱式桩腿,受环境作用影响较

2 自升式钻井平台

小,忽略不计。沿钻井平台桩腿方向和海底泥面建立坐标系,平台受到的水平方向风载引起的水平力 P ,平台桩腿在平台升降受到水平位移引起的内弯矩 M ,桩腿自泥面至平台长为 l ,得到平台的受力模型如图 2-1-3 所示。

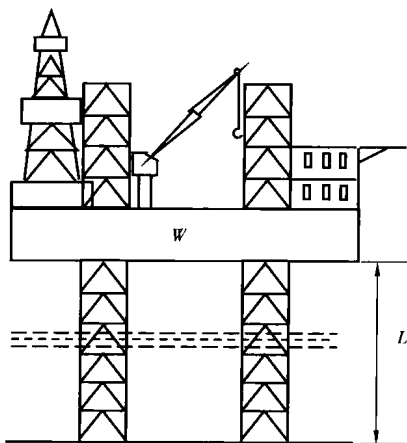


图 2-1-2 钻井平台升船示意图

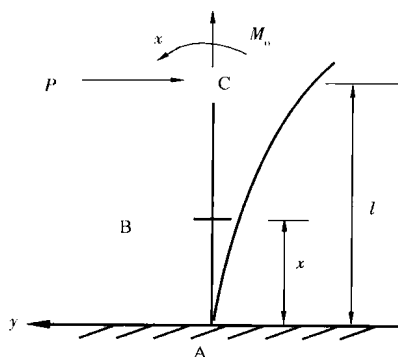


图 2-1-3 钻井平台桩腿受力模型

沿桩腿方向取截面 B, 可得:

$$M_x = M_0 - P(l - x) \quad (2-1-1)$$

而此时, 桩腿的挠曲方程:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2-1-2)$$

$$\therefore \theta = y' = \int \frac{M(x)}{EI} dx + c \quad (2-1-3)$$

式(2-1-1)代入式(2-1-3)可得:

$$\begin{aligned} \theta = y' &= \int \frac{M_0 - P(l - x)}{EI} \cdot dx \\ \theta &= \frac{1}{EI} \left[(M_0 - Pl)x + \frac{1}{2}Px^2 \right] + c \end{aligned} \quad (2-1-4)$$

已知边界条件: $x=0, \theta=0$ 代入式(2-1-4)可得:

$$c = 0 \quad (2-1-5)$$

$\therefore$ 式(2-1-5)代入式(2-1-4)可得:

$$\theta = \frac{1}{EI} \left[(M_0 - Pl)x + \frac{Px^2}{2} \right] \quad (2-1-6)$$

由式(2-1-6)而得挠曲方程为: