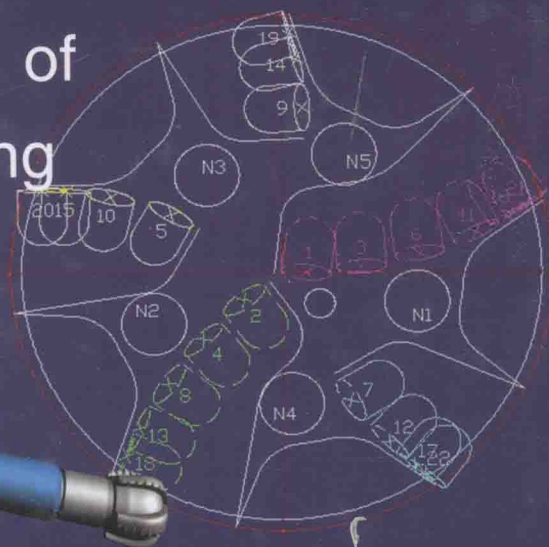


旋转导向钻井 工程力学

姜 伟 周建良 程载斌 牛海峰 吴光武 著

Engineering Mechanics of
Rotary Steerable Drilling

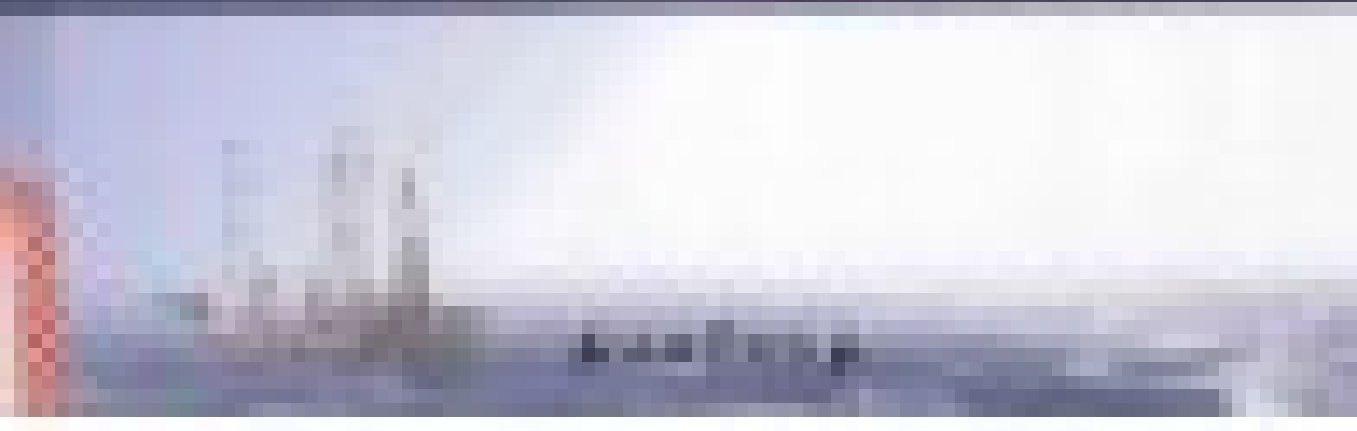


石油工业出版社

旋转导向钻井 工程力学

编 著 周建群 孙 强 李 强 王 强 编

Engineering Mechanics of
Rotary Steerable Drilling



旋转导向钻井工程力学

Engineering Mechanics of Rotary Steerable Drilling

姜 伟 周建良 程载斌 牛海峰 吴光武 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了旋转导向钻具组合的静力学建模、计算、优化分析方法,引入多体动力学理论进行旋转导向钻井系统的动力学建模,研究全井段钻柱系统的动力学与运动学问题,为钻柱动力学提供了一种新的理论方法。本书内容反映了十一五国家 863 重点项目“旋转导向钻井系统工程化技术研究”的研究内容及成果。

本书可供从事钻井工程管柱力学的科研和技术人员阅读,对大专院校相关专业的教师及研究生具有重要参考价值。

Abstract

This book was based on some research findings about the rotary steerable drilling technology during eleventh five-year plan of the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) for CNOOC Research Institute. The static modeling, numerical calculation and optimization analysis of rotary steering bottom hole assembly (RSBHA) was introduced in detail. The dynamic modeling of RSBHA and the study on dynamic and kinematics of full hole drillstring were carried out by introducing multi-body dynamics theory. It provided a new way for drillstring dynamics.

This book can be used by researchers or engineers majored in drill stem mechanics, as well as college teachers and students.

图书在版编目(CIP)数据

旋转导向钻井工程力学 / 姜伟等著 .

北京 : 石油工业出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5021-9654-7

I . 旋…

II . 姜…

III . 油气钻井 — 钻井工程 — 工程力学

IV . TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 144524 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

编辑部 : (010) 64523583 图书营销中心 : (010) 64523633

经 销 : 全国新华书店

印 刷 : 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本 : 1/16 印张 : 9

字数 : 218 千字

定价 : 48.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

攻坚克难，我们吃了旋转导向钻井系统 研发的第一只螃蟹

——坚持走旋转导向钻井技术的自主创新之路，
助推中海油钻完井技术的二次跨越（代序）

研究人员整整 15 年的人生经历，与中海油的钻井技术研究（旋转导向钻井技术）起步、彷徨和进一步发展紧紧纠结在一起，经历和目睹了中海油（特别是钻采专业）引进、消化、吸收再创新发展战略的逐渐推进，直到“创新二次跨越”提出，也隐隐约约饱尝了其间的思考、徘徊和阵痛。

1997 年美国菲利普斯石油公司的大位移钻井技术在我国西江南 4-3 油田 A17 井 8000m 水平位移大位移井的成功应用，中海油得到了参与和学习，给我们海洋石油钻井人开了一扇窗户，为之一振，得到中国石油界的极大关注，在国家“九五”863 计划的支持下，我们研究了自己的大位移钻井技术，并在渤海油田歧口 17-2 和秦皇岛 32-6 油田 6 口井中得以实施，迈出了中国人钻大位移井的第一步，并在国内得到了逐步推广和应用。其中的关键井下工具——井下闭环可变径稳定器的创新思想，是研究旋转导向钻井技术的星星之火，为研究钻井人梦想的具有“高技术、高投入、高回报”的旋转导向钻井技术埋下了伏笔和种子。

从 1997 年 7 月到 2012 年 6 月 18 日，整整 15 年的大好时光，中海油研究总院这一团队及一批教授学者（西安石油大学傅鑫生教授、西南石油大学陈平教授、中天启明创业者石岩峰经理等专家）被紧紧地凝聚在一起，中国人自己的一只丑小鸭在其间孕育出生，一颠一颠地艰难前行。1998 年我们提出研制机电可控的井下闭环能增降斜的稳定器原理样机，做不做这件事情在我们内部也引起了争论：“我们与国外钻井技术相差几十年，能做出来吗？”“我们是油公司，有必要搞研发吗？”在怀疑声中，我们于 2000 年自主研制出了可用于大位移井的井下闭环可变径稳定器原理样机。

2001 年，国外旋转导向钻井系统已开始在我国海上油田商业化应用。为了跟踪国外前沿技术，我们在国家科技部的鼎力支持下，项目得到延续，第二个五年得到了国家 863 计划的支持，当时一个巨大的难题摆在我们面前：在 30mm 的狭小环形空间内要安放所有机电液压仪器，并且所涉及的一些关键部件（微型电动机和液压泵）无法买到和进口，最后我们选择了避开一些关键元器件，以原理相对简单的循环钻井液为动力的旋转导向钻井系统样机，作为研发目标进行攻关。2005 年研制出两套原理试验样机，在单向控制、手动开停泵发送指令、轴套有触点滑环连接及七芯机电连接方面取得了进展和突破，得到国内专家的肯定和国家的支持和期待。2008 年，第三个五年又列入了国家 863 计划，力争在原理样机基础上改进和提高，研制工程试验样机。在 2006 年至 2007 年，完成了旋转导向工具的核心部件——双向控制液压定位总成，2008 年完成了改进后的试验样机，经室内装配调

试后，于 2009 年 4 月在甘肃华池进行了工程样机的第一次下井试验，实现钻进 104m，下传指令正常，达到微增斜效果。随后三年研制出了三套工程样机，先后辗转于甘肃华池、甘肃庆阳、天津塘沽、四川广汉等地进行了 13 次大型试验，下井试验 30 多次，通过试验改进了下传指令方法和装置、井口不同工具连接程序、工具系统的下部钻具组合优选，工具内部的耐冲蚀性结构，钻头水眼的选择、现场关键部件更换和井口调试程序、井下闭环的实现方法及电器的可靠性等。在前两年的试验中，每一次试验都是刻骨铭心的，精心的准备，虽然有进步，换来的却是一次又一次失败，劳累、野外试验的天寒地冻考验、酷暑的炙烤、彻夜的井台组装调试、对井下导向钻进效果的期盼、意外的失败和因为出现钻井作业异常、卡钻前兆或进尺慢而终止试验，以及来自各方面的压力等交织在一起，这些对团队人员都是极大的考验和心理阴影。没有办法只有总结教训、再改进、再提高，在最近半年的几次试验，一次比一次问题少，显示了成功的曙光，下井试验时电气可靠性显著提高，工具外套防转的规律得到初步认识，工具特性与钻进参数的配合趋于合理，实现了井下闭环调控，试验得到了明显的导向效果，在多次的钻井试验中，取得了 $3 \sim 5^{\circ} / 30\text{m}$ 增斜的效果，初步实现了课题的目标，开发了具有自主知识产权的一套旋转导向工具系统样机（20 套硬件装备、5 套软件），并经历了 35 井次现场试验的考验，构建了一套旋转导向钻井技术体系（9 大技术系列，66 项关键技术），形成了一套技术集成，完成 33 项专利、42 篇学术论文和 2 部专著；课题“十五”研究成果之一的 MWD 系统，目前已具备年产 200 套成套仪器的加工生产能力，近年来仅在中海油系统的销售收入就突破 1 亿元人民币，在中海油系统 MWD 系列实现了完整的进口替代，节约成本已达到 5400 万元；课题研究成果钻井工程参数测量工具已具备工业应用能力，目前已开始销售和逐渐产业化。2012 年 6 月 18 日，顺利通过了国家科技部对课题的验收，对课题组的艰难探索和十多年坚持不懈的精神给予了充分的肯定。

中国是钻井大国，不是钻井强国，作为中海油研究总院技术专家团队与一批大学教授，经历了十多年如一日的钻研、辛劳、一次次失败和意志磨砺，他们吃了第一只螃蟹，取得了初步成果。当然，项目还存在很大的不足，没有走到产业化和最终为中海油带来直接的经济效益也带来一些遗憾，但是，给我们更大欣慰的是：我们在国家层面上，在前瞻性技术方向上，引领和开拓了旋转导向钻井技术的研究和发展，为国内石油钻井行业发展旋转导向钻井技术提供了宝贵经验并进行了良好的开端，达到了为中海油占领核心技术高地，作为技术引领者的目的，也为中海油开展工业化和产业化做好了技术和项目衔接。

中国工程院院士
国家能源局深水工程技术研发中心主任

曾恒一

前 言

本书针对石油钻井工程和技术发展的需要,对旋转导向钻柱力学问题进行了比较系统的研究。旋转导向钻柱力学是研究旋转导向钻井的特有结构——大长细比柔性旋转梁在狭长井眼内的力学问题,是油气井工程与力学的交叉学科。

本书较为系统地阐述了旋转导向钻柱系统的静力学、动力学和运动学,特别是引入了多体系统动力学理论进行动力学和运动学分析。全书共分为8章。第1章简要介绍了旋转导向钻井技术的发展概况、旋转导向工具研制及应用和油气井管柱力学分析方法,并简述了多体系统动力学的发展现状;第2章介绍了旋转导向钻具组合导向力的静力学特征;第3章介绍了不同结构的旋转导向钻具组合的静力学计算结果及分析;第4章介绍了RSBHA导向力计算分析系统软件研制与应用;第5章引入多体系统动力学理论,介绍了旋转导向钻井系统多体动力学建模方法;第6章介绍了系统动力学方程的数值算法及旋转导向钻井系统仿真试验软件平台的开发;第7章介绍了推靠式旋转导向钻井系统的动力学特性;第8章介绍了指向式旋转导向钻井系统的动力学特性。

本书是十一五期间中海油研究总院进行旋转导向钻井技术研究的部分成果总结。静力学部分建立了旋转导向BHA在三维井眼内的静力学模型,提出了描述井眼轨迹特征的弯曲平面倾角模型和复合钻井下部钻具组合导向力计算模型,采用加权余量法求解得到了钻头侧向力和钻头转角等结果,并对BHA结构进行了优化分析。所得结果为现场试验提供了必要的指导。动力学和运动学部分首次采用多体系统动力学方法建立了全井段旋转导向钻井系统的三维力学模型。采用绝对节点坐标梁单元建立大长细比柔性钻柱系统模型,并建立了旋转导向工具的刚—柔耦合多体动力学模型。采用向后差分方法求解微分—代数方程组,研究了全井钻柱系统的动力学问题以及钻进时的动力学与运动学问题,给出了优化的钻井参数及BHA结构,为钻柱动力学提供了一种新的理论方法,并为旋转导向工具研制和油田现场试验提供了有价值的指导。

本书可供钻井工程技术人员和石油院校有关专业教师、研究生参考。

衷心感谢清华大学、上海大学等合作单位的辛勤劳动和大力支持。由于作者水平有限,书中难免有疏漏或不当之处,敬请读者批评指正。

著者



项目中期检查西安会议合影（2009年6月）

863计划海洋技术领域“旋转导向钻井系统工程化技术研究”重点项目验收会
2012年6月18日



“旋转导向钻井系统工程化技术研究”项目验收会（2012年6月）



旋转导向钻井系统现场试验——天津塘沽（2012 年 3 月）



项目长与课题主要研究人员现场讨论（2010 年 8 月）



项目清华大学课题组研究人员讨论（2011 年 8 月）



旋转导向钻井系统样机

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 旋转导向钻井技术发展概况	1
1.2 旋转导向工具的研制与应用	2
1.3 油气井管柱力学研究现状	5
第 2 章 旋转导向 BHA 导向力的静力学特征	12
2.1 数学模型	12
2.2 旋转导向 BHA 导向力计算的加权余量解	16
2.3 弯曲平面倾角的计算模型	21
2.4 导向能力预测的地层平衡侧向力法模型	23
第 3 章 旋转导向 BHA 导向力的静力学计算分析	24
3.1 旋转导向 BHA 导向力计算分析及结果验证	24
3.2 带柔性短节的 BHA 导向力计算分析	27
3.3 旋转导向 BHA 导向力分析及实例优化	35
3.4 静力学分析主要结论	44
第 4 章 旋转导向 BHA 导向力计算分析系统软件研制与应用	46
4.1 软件研制	46
4.2 试验用旋转导向 BHA 导向力计算分析	49
4.3 主要结论	52
第 5 章 旋转导向钻井系统多体动力学建模方法	53
5.1 旋转导向钻井系统力学模型描述	53
5.2 钻柱系统绝对节点坐标梁单元模型	60
5.3 旋转导向钻井系统相关约束模型	65
5.4 旋转导向钻井系统中相关作用力模型描述	70
第 6 章 旋转导向钻井系统仿真试验软件平台开发	83
6.1 数值计算方法	83
6.2 多体系统动力学仿真软件研制	86
第 7 章 推靠式旋转导向钻井系统的动力学特性	93
7.1 二维水平井算例研究	93
7.2 旋转导向钻具的优化仿真试验研究	109
7.3 旋转导向钻具系统其他相关问题研究	112
7.4 结论与建议	116
第 8 章 指向式旋转导向钻井系统动力学特性	117
8.1 指向式旋转导向钻井系统模型建立	117
8.2 指向式导向钻具模型计算结果	119
8.3 指向式导向钻具模型计算结论	121
参考文献	123

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of rotary steerable technology	1
1.2 Development and application of rotary steering tool	2
1.3 Research status of drillstring mechanics	5
Chapter 2 Static characteristics of biasing force for rotary steering BHA	12
2.1 Mathematical model	12
2.2 Weighted residual solution of biasing force	16
2.3 Mathematical model of bending plane angle	21
2.4 Balance lateral force model for biasing capacity prediction	23
Chapter 3 Static analysis of biasing force for rotary steering BHA	24
3.1 Static analysis and results verify	24
3.2 Analysis of BHA with flex sub	27
3.3 Analysis and optimization of biasing force for rotary steering BHA	35
3.4 Main conclusions for static analysis	44
Chapter 4 Software development and application of BHA biasing force analysis	46
4.1 Software Development	46
4.2 Biasing force analysis of rotary steering BHA using in field test	49
4.3 Main conclusions	52
Chapter 5 Multi-body dynamic modeling method of rotary steerable system	53
5.1 Mechanical model	53
5.2 The absolute nodal coordinate beam element for drillstring	60
5.3 Constraint model	65
5.4 Force model	70
Chapter 6 Simulation software development for rotary steerable system	83
6.1 Numerical method	83
6.2 Software development based on multi-body dynamical method	86
Chapter 7 Dynamical characteristics of push-the-bit rotary steerable system	93
7.1 Case study on two-dimensional horizontal wells	93
7.2 Virtual prototype test of rotary steering tool	109
7.3 Research on other related dynamic issues	112
7.4 Conclusions and suggestions	116
Chapter 8 Dynamical characteristics of point-the-bit rotary steerable system	117
8.1 Simulation model	117
8.2 Simulation results	119
8.3 Main conclusions	121
Reference	123

第1章 绪 论

1.1 旋转导向钻井技术发展概况

旋转导向钻井技术是迈向自动化、智能化钻井的重要标志,是一种适合恶劣工作环境的高尖端技术。以井下闭环旋转导向钻井系统为核心的三维井眼轨迹控制钻井技术,代表了当今石油钻井工程的领先水平。国外在水平井、大位移井、大斜度井、三维多目标井中推广应用旋转导向钻井技术,既提高了钻井速度,减少了事故,也降低了钻井成本。旋转导向闭环钻井技术是今后井眼轨迹控制技术的发展方向。钻柱的连续旋转减少了摩阻,可以有更长的水平位移,具有更大的延伸能力;清洁井眼,减小卡钻的风险;无需起下钻调整工具面,提高了钻井效率;及时调整作业提高了控制的精度;导向时可使用最优钻压值,提高了机械钻速,发挥钻头最佳效能。

20世纪90年代初国际上就开始研究旋转导向钻井技术,到20世纪90年代中期,已有美国、英国、德国、意大利、日本等5个国家的8家大公司掌握其工程应用和商业化技术服务市场。但这项技术总体上仍处于快速发展之中,国际竞争十分激烈。它的先进性、优越性、方向性足以表明它是当今世界钻井技术的重大革命。国外目前已推出多种旋转导向钻井系统,其中以Baker Hughes的Auto Trak系统、Schlumberger公司的Power Drive系统、Sperry Sun公司的Geo-Pilot系统最具代表性。这些系统以其工作原理的差异分为推靠式(Push the bit)和指向式(Point the bit),都可实现井眼轨迹的连续、光滑导向。当其配置LWD系统时,其又能实现水平井轨迹的精确控制,实现地质导向。国内目前还没有成熟的旋转导向钻井工具进入工业应用。

旋转导向钻井系统的优点不言而喻,促使国内许多企业和研究机构开始这项技术的攻关工作。1994年中海石油研究中心与西安石油大学开展合作研究类似于Auto Trak系统的旋转导向工具,并得到国家863计划资金、国家自然科学基金等资助。张绍槐、狄勤丰等在国家自然科学基金的资助下,开展了类似Power Drive系统的旋转导向工具的研制工作,2002年,与胜利油田钻井院联合攻关,并得到863计划资金的资助。随着高陡构造防斜问题的出现,国内多家单位开始了主要用于直井的垂直钻井系统的研制工作,包括自行研制(如中国石油集团钻井工程技术研究院、胜利油田钻井研究院等)和与国外联合研制(如华北油田钻井工艺研究院)。2008年开始,在国家863和重大专项资金的资助下,又有一些单位开展旋转导向工具的研制工作。

虽然旋转导向工具可以提供很好的主动控制力,可以提供比滑动导向工具(如螺杆钻具)更为有效的导向能力。但是,这种工具只有在合适的工作环境中才能更好地发挥其性能优势,才能避免系统失效,这在系统攻关阶段尤为重要。这就需要对旋转导向钻具组合进行力学分析。

现代旋转导向钻井中,全井段钻柱的长细比为 $10^4 \sim 10^5$,由一系列空心圆截面钢管连

接而成，包括下部旋转导向钻具组合和钻头，地面由顶驱或转盘驱动并控制钻进速度，导向动力由钻井液压差或井下电动机驱动。钻柱的高速旋转使其在充满钻井液的狭长井眼内处于十分复杂的受力、变形和运动状态，直到今天仍然无法做到对钻柱系统动力学、运动学特性的准确描述和精确的定量计算。随着旋转导向工具（RST：Rotary Steering Tool）、随钻测量工具 MWD/ 随钻测井工具 LWD、井下工程参数测量仪、柔性短节等装备加入到下部钻具组合（BHA：Bottom Hole Assembly）中，必须全面考虑旋转钻进动力与导向动力的控制以及动态导向钻进过程，这使得旋转导向钻柱系统的动力学问题变得更加棘手。

1.2 旋转导向工具的研制与应用

目前世界上主要有两类旋转导向钻井系统应用于现场，即所谓的推靠式（push the bit）旋转导向钻井系统和指向式（point the bit）旋转导向钻井系统。按照这种概念，旋转导向钻井系统的主要基本类型如图 1.1 所示。

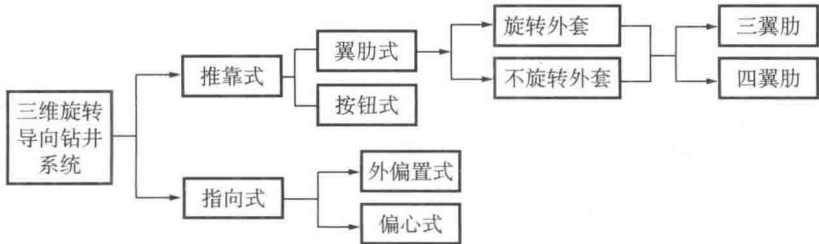


图 1.1 旋转导向钻井系统的基本类型

推靠式旋转导向井下工具中，偏置稳定器安放在靠钻头位置，其后面串接一个或多个钻柱稳定器，为了减小上部的钻柱力学性能对底部钻具组合导向性能的影响，串接了一根柔性钻具。在旋转导向过程中，偏置工具的偏心产生的钻头侧向力起主要导向作用。这样导向方式的特点是钻头的侧向力大，造斜率高，但旋转导向钻出的井眼狗腿大，轨迹波动大，不平滑。

指向式旋转导向井下工具中，偏置稳定器安放在两个稳定器之间，为了减小上部钻柱力学性能对底部钻具组合导向性能的影响，串接了一根柔性钻具。在旋转导向过程中，偏置工具的偏心导致其上下两跨钻柱发生弯曲，使钻头处钻柱的轴线和井眼轴线之间出现夹角，当然也有侧向力，但主要是由于钻头的转角而实现的旋转导向。这样导向方式的特点是钻头侧向力较小，造斜率较低，但旋转导向钻出的井眼狗腿小，轨迹平缓。

国际上现有的旋转导向工具中：Auto Track 为推靠式三翼肋不旋转外套旋转导向钻井系统、Power Drive 属于推靠式三翼肋旋转外套式旋转导向工具，而 Geo-Pilot 属于指向式偏心式旋转导向工具。从现场应用效果来看，指向式旋转导向钻井工具钻出的井眼轨迹平滑，井身质量优于推靠式。

Baker Hughes 公司的 Auto Trak RCLS 系统通过对非旋转外套上的 3 个翼肋施加不同压力形成导向合力矢量来控制井眼轨迹，采用电动机—泵驱动，为静态偏置力推靠式（图 1.2）。

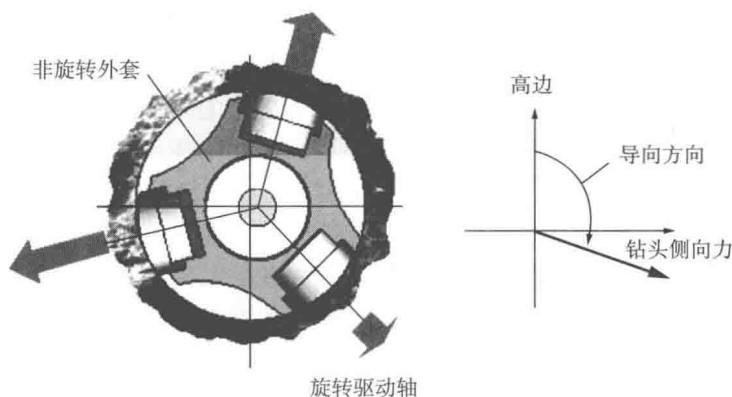


图 1.2 Auto Trak 旋转导向工具工作原理图

Auto Trak 旋转导向工具的特点是：

- (1) 旋转钻进过程中实现连续井斜、方位的调整，有较强的稳斜能力，便于长稳斜段的钻进；
- (2) 能自动定向控制，提供精确的地质导向和油层定位；
- (3) Auto Trak 调整方向的计算是参照重力高边，对于井斜小于 3° 的井 Auto Trak 很难精确计算出高边位置，不能够从垂直井段按指定的方向侧钻；
- (4) 井下工具与地面系统之间能够在旋转钻进过程中进行双向信息通信，可对井眼轨迹进行实时调节；
- (5) 导向时，工具面变化不宜过大，狗腿度不能过小，否则浪费作业时间；
- (6) Auto Trak 可以与钻井液马达一起使用，以提供给钻头更多的功率或减少钻杆、套管的磨损。

Schlumberger 公司的 Power Drive 调制式全旋转导向工具通过承受高压的 1 个翼肋拍击井壁的频率和方向来控制井眼轨迹，外套在钻井过程中旋转，采用钻井液压差驱动，为动态偏置推靠式（图 1.3）。

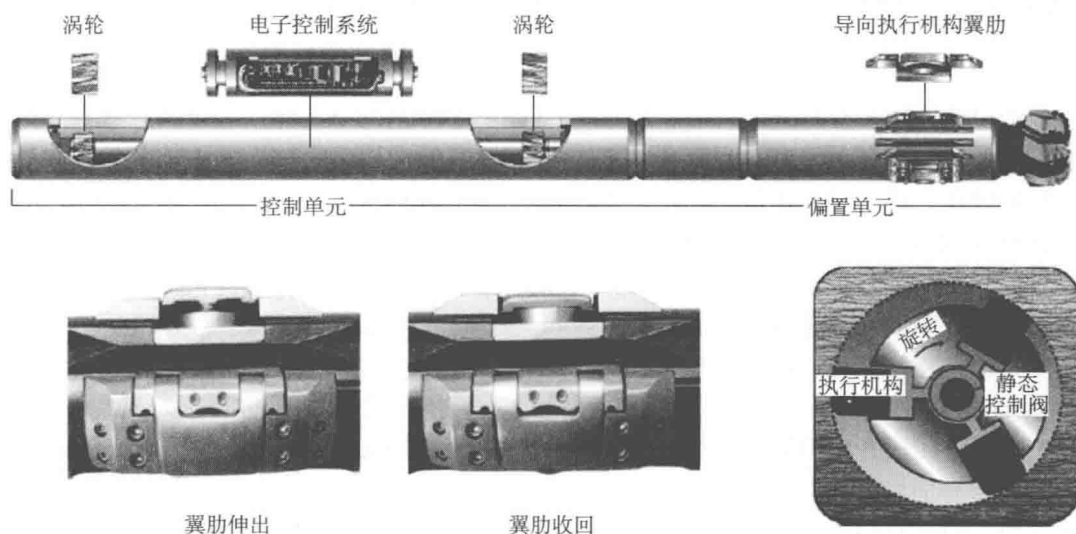


图 1.3 Power Drive 旋转导向钻井系统结构示意图

Power Drive 系统由控制部分稳定平台和翼肋支出及控制机构组成。其导向原理与 Baker Hughes 公司的 Auto Trak RCLS 导向钻井工具类似，都是利用近钻头导向块的伸缩与井壁相互作用产生导向力，但结构有所不同：没有静止的不旋转套，三个翼肋与钻柱一起旋转。它的控制器、旋转换向阀及测量机构都置于钻柱中间，可以保持相对静止。旋转换向阀可以旋转到任意方向再保持静止。

该工具具有自我稳定的钻井液动力和密封控制单元，通过旋转测控稳定平台同步调整井眼走向。当需要在某个方向导向时，随钻柱一起旋转的周向均布的 3 个导向块会在控制系统施加的液压力的作用下，每转 1 周每个导向块都要在该方向上伸出 1 次，顶向井壁产生导向力，从而对钻头动态的产生一侧向力，推动钻头离开该方向，达到改变井斜和方位的目的，转离该方向后，导向块自动缩回。

Halliburton Sperry Sun 公司的 Geo-Pilot 旋转导向自动钻井工具通过控制其内外偏心环机构的角度使驱动轴发生弯曲变形，从而形成偏心位移来控制井眼轨迹，为静态偏置指向式（图 1.4），其主要由旋转主轴、不旋转外套、偏心环偏置机构（Eccentric Cam Unit）、悬臂轴承（Cantilever Bearing）、支点承座（Focal bearing）等部分构成；另外还包括电子控制与传感器（Control Electronics & Sensors）、偏心环偏置机构驱动装置（Drive Mechanism）、防旋转机构（Anti-Rotation Device）、旋转动密封（Rotary Seals）及液压补偿系统（Pressure Compensator）等。

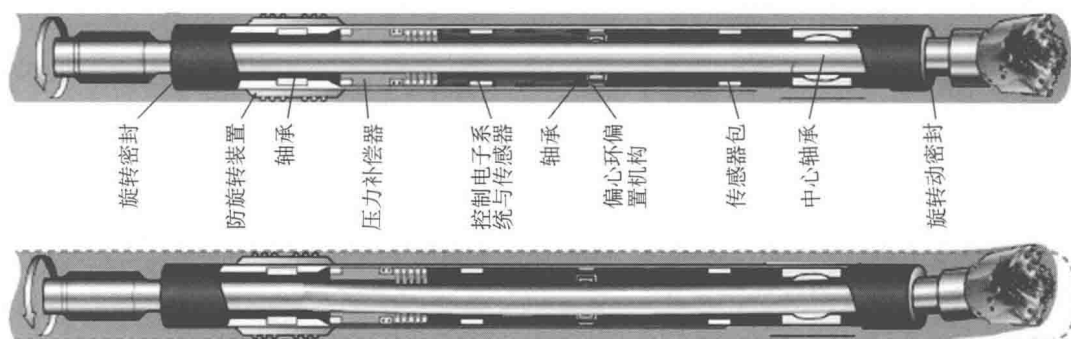


图 1.4 Geo-Pilot 旋转导向钻井系统结构示意图

但与 Auto Trak 和 Power Drive 不同的是 Geo-Pilot 系统不是靠推靠钻头进行导向，而是靠不旋转外套与旋转主轴之间的偏置机构使主轴偏置，从而为钻头提供一个与井眼轴线不一致的倾角，产生导向作用。其工作原理如图 1.5 所示。

在推靠式旋转导向工具中，钻头侧向力起主要导向作用，指向式则主要依靠钻头转角实现导向。国外新发展的 RST 采取了更为灵活、先进的工作方式，导向机构中采用了无级变速技术，工具最大造斜能力达到 $15^{\circ}/30\text{m}$ (216mm 或 222mm 井眼)，井眼适用范围越来越宽，位移延伸能力也越来越强。

从国外发展情况来看，各大石油公司正致力于指向式旋转导向工具的研究和开发。Sperry Sun 公司已开发出第三代指向式旋转导向钻井系统 Geo-Pilot。近几年，一直致力于推靠式旋转导向钻井系统发展的 Schlumberger 公司推出了一种指向式全旋转旋转导向钻井工具（图 1.6），其偏置机构也像 Geo-Pilot 那样采用了偏心环机构，但其外套是旋转的。

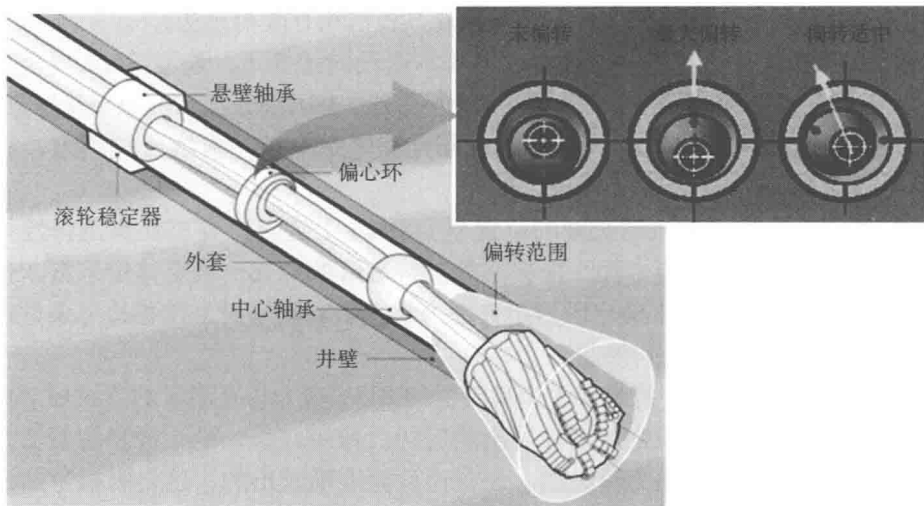


图 1.5 Geo-Pilot 旋转导向工具工作原理

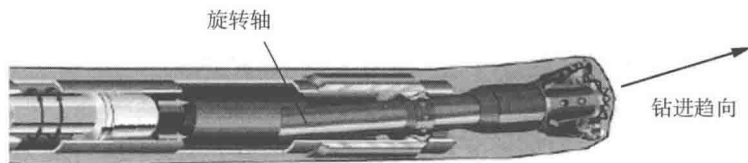


图 1.6 Power Drive Exceed 旋转导向钻井工具

综上所述，指向式旋转导向钻井工具由于其具有井眼质量好、工作时不依赖于井壁等诸多特点，而成为今后旋转导向钻井系统的发展方向

由于国外对旋转导向技术实行技术封锁，垄断了技术服务市场，国内开始自行研制旋转导向钻井系统 (RSS)。经过多年的研究、试制，研制成功具有自主知识产权的 RST 样机，对其工作方式、控制方案及力学性能进行了研究。但整体技术水平与国外有较大差距。由中海油研究总院牵头研制的偏置位移式 RST 的导向方式与 Auto Trak 类似，均采用三翼肋偏置导向机构，在钻头上部都有一个不旋转外套用作导向控制基准，为静态偏置式。不同之处在于：Auto Trak 采用压力矢量导向，而国内的旋转导向工具采用偏心位移矢量导向。它的驱动方式与 Schlumberger 公司 Power Drive XTRA 导向工具类似，都是以钻井液压差为动力驱动翼肋动作。目前，偏置位移式旋转导向工具正处于工业试验阶段。

1.3 油气井管柱力学研究现状

1.3.1 油气井管柱力学分析方法

对钻柱系统进行力学分析，是经验钻井和科学钻井的分界线。钻柱力学的长期发展形成了 4 种比较典型的 BHA 力学分析方法：即以 A.Lubinski 为代表的微分方程法；以 B.H.Walker 为代表的能量法；以白家祉为代表的纵横弯曲连续梁法；以 K.K.Millheim 为代表的有限单元法。其主要区别在于力学建模方法不同，同一力学模型中又可以有多种不同的求解方法。