

# 基于驱动装置的钻孔重入系统偏移控制分析

王林清, 刘晓林, 朱芝同, 和国磊, 许本冲

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 深海钻探中, 无隔水管钻进工艺不受隔水管长度限制, 能够在所有水深范围内实施钻探作业, 但随水深增加钻具重入钻孔难度极大, 钻孔重入系统对于无隔水管钻探尤为重要。深海钻探工况十分复杂, 受海浪洋流等各种因素作用, 钻柱近似为柔性杆件, 在不使用水下机器人(ROV)的情况下, 常规钻柱重入作业耗时很长, 成功率低, 即使通过上部移船的方式移动钻柱受到海况因素制约也很难实现。因此, 研究钻孔重入系统偏移控制技术对于深海钻探大有裨益。通过分析自由状态下钻柱重入钻孔的姿态及效率, 使用带有驱动装置的钻孔重入系统, 针对性平衡钻柱底部的水动力作用, 可有效保证重入钻孔时底部钻具的稳定性, 最大程度缩短重入钻孔时间, 减少深海无隔水管钻探工艺成本。

**关键词:** 深海钻探; 无隔水管; 钻孔重入; 偏移控制; 驱动装置

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)S1-0456-05

## Analysis of deviation control for drilling re-entry system based on driving device

WANG Linqing, LIU Xiaolin, ZHU Zhitong, HE Guolei, XU Benchong

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** In deep-sea drilling, the drilling process without a riser is not limited by the length of the riser, and can carry out drilling operations within all water depths. However, as the water depth increases, the difficulty of drilling tools re-entering the borehole is extremely high, and the drilling re-entry system is particularly important for drilling without a riser. The working conditions of deep-sea drilling are very complex, and due to various factors such as ocean waves and currents, the drill string is approximately a flexible rod. Without the use of ROV, the conventional drill string re-entering operation takes a long time and has a low success rate. Even if the drill string is moved by the upper moving ship due to sea conditions, it is difficult to achieve. Therefore, studying the deviation control technology of the drilling re-entry system is of great benefit for deep-sea drilling. By analyzing the posture and efficiency of the drill string re-entering the borehole in a free state, a drilling re-entry system with a driving device is used to balance the hydrodynamic effect at the bottom of the drill string, effectively ensuring the stability of the bottom drilling tool during re-entering the borehole, minimizing the re-entry drilling time, and reducing the cost of the deep-sea non riser drilling process.

**Key words:** deep-sea drilling; no riser; drilling re-entry; deviation control; driving device

## 0 引言

随着陆地和浅海资源开发力度的加大, 这些区

域的资源越来越少, 开采深度越来越深, 开采难度

越来越大, 深海资源的开发利用将成为未来全球资

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2023-08-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.073

基金项目: 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目“天然气水合物储层改造增产与测试技术支撑”(编号: GDNRC[2022]44); 工业和信息化部项目“天然气水合物钻采船(大洋钻探船)总装建造关键技术研究”(编号: CJ05N20)

第一作者: 王林清, 男, 汉族, 1993年生, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探新技术、新设备新工艺的研发工作, 河北省廊坊市金光道77号, wanglinqingmail@163.com。

引用格式: 王林清, 刘晓林, 朱芝同, 等. 基于驱动装置的钻孔重入系统偏移控制分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 456-460.

WANG Linqing, LIU Xiaolin, ZHU Zhitong, et al. Analysis of deviation control for drilling re-entry system based on driving device [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 456-460.

源开发的主攻方向<sup>[1-2]</sup>。目前,海洋钻探主要有隔水管钻进和无隔水管钻进2种工艺方法<sup>[3]</sup>。采用隔水管钻井工艺时,作业船只或平台通过下入隔水管,建立连接水面到泥面的通道来实现钻井液循环,可较为简单的实现钻孔内钻具的提出和重新下放。但隔水管体积及质量大,施工作业效率低、成本高,而且存在钻井液循环压力易导致浅部软弱地层压裂漏失的问题。

无隔水管钻探作业可避免作业时需携带大量隔水管而挤占船上空间,以及孔内钻井液循环压力大的问题。但2种钻探工艺都无法避免的是,随着地层的变化和进尺的加深,钻头磨损情况会越来越严重,单次钻进深度非常有限,一般仅几百米就需要更换钻头,如果要增加钻进深度,需要频繁更换钻头、钻具重入原钻孔。同时,一个开次完成之后还需要下入套管进行固井,为了达到更深的钻进深度和应对复杂井身结构需求,也需要频繁更换钻头、钻具后重入原来的钻孔<sup>[4-6]</sup>。钻孔重入系统就是要在更换钻头、钻具后使钻头可以顺利的重入原钻孔,实现多次重复钻进而产生的。由于钻探船会随洋流漂移,加之在海水环境中钻杆有几百米甚至几千米长,因此,钻孔重入系统偏移控制是海洋无隔水管钻探作业中的一项关键的技术难点。

## 1 钻孔重入技术原理

在深海钻探中,钻孔重入系统中设有一个称之为“重入锥”(Re-entry Cone)的大直径喇叭体(见图1),用以将钻头导入钻孔。首次下钻时,用钻杆将重入锥送入海底泥面。重入锥附近安放有声纳发射器,其信号经船上的接收器接收并处理后,可以确定重入锥的位置。根据测量结果移动钻探船,可实现钻柱的初步定位。等到下钻至接近重入锥时,沿钻杆柱下入水下电视,观察洋底重入锥的位置,根据观察结果移动钻探船,实现钻头位置精调。只要钻头落在重入锥的内锥面上,钻头便可沿着锥面滑向钻孔,最终进入钻孔。

## 2 钻孔重入系统钻柱控制技术发展现状

在深水无隔水管钻探系统中,提钻并更换钻头后钻柱需重新进入孔位继续钻进,但由于钻柱处于径向无约束状态,在船体运动和洋流的作用下非常不稳定,重新入孔难度较大,需要采取一定的措施和



图1 重入锥

方法辅助控制钻柱在海底的运动状态,使钻柱重新进入原来的孔位。超深水钻孔重入技术通过一定的机械或者喷冲等措施来控制钻柱的偏移,是钻孔重入系统的关键技术,其控制精度和操控性能直接影响超深水钻孔重入的可行性,并且钻孔重入系统能力决定着钻采船有效的工作水深指标。

目前针对该问题提出的解决方法主要从2个方面入手,即主动移位和被动接收<sup>[7-10]</sup>。主动移位是指在钻柱上安装定位信标,实时监测钻柱和孔口之间的位置,通过动力移船、钻柱侧向喷水推进、水下机器人(ROV)/驱动装置等对钻柱进行调整;被动接收是指在孔口安装导向锥(重入锥)等孔口扩张装备,方便钻柱进入孔口。

目前实际使用中,被动接收通常作为配合主动移位的辅助工艺使用。而主动移位主要采用动力移船或者ROV两种方式等对钻柱进行调整。其中,动力移船是目前钻孔重入使用最广泛的工艺方法,但需要大量实际操作经验,且对作业海况有较高要求。而ROV不仅价格高、运行费用十分昂贵、配套服务难,而且对重入钻孔操作的抗流动能力及作业能力均显不足,在国内外应用都比较少。国内深海钻探尤其是大洋钻探相对较少,国内钻孔重入尝试也相应较少,因此尚没有专门适用于重入钻孔的水下设备,遇到钻孔重入工况时多通过动力移船的方式调整钻柱位置进入孔内。

国际上早在1968年就开始了深海钻探钻孔重入的尝试<sup>[9-14]</sup>,格罗玛挑战者号搭载的首套重入系统(见图2)包括以下组成部分:投放在海底的声纳信标(Sonar Beacon),安装在钻孔口的重入锥(Re-entry Cone)及锥上的3个声呐反射器(Re-entry Reflector),钻头上的声纳扫描仪(Sonar Scanner),钻头附近钻杆上的喷水嘴(Water Jet),再加上与之配

合的主推进器、4个辅助电动推进器及控制计算机构成的动力定位(Dynamic Position)系统。喷水嘴技术实际应用效果欠佳,其被否认的原因主要包括:(1)喷水嘴对钻杆的侧向移位距离有限,最大位移 $\neq 6\text{ m}$  (20 ft);(2)使用喷水嘴推动钻杆侧向移位虽然能减少将钻头对正重入锥所需的时间,但是使用喷水嘴需要把钻杆前端堵塞,重入后移除塞子并关闭喷水嘴的操作需要额外的电缆起下工具操作,节约的时间不足以弥补起下工具所需的时间,得不偿失;(3)试验中关闭喷水嘴的工具失效,水嘴没有关闭成功随后启用了仅使用船舶动力定位(DP)系统进行钻杆移位重入的方案。

驱动装置作用原理与ROV相同,通过在钻杆底部施加推力,带动整个钻柱移动至孔口附近。但其作为新兴概念,在国内外均无使用记录。

随着我国深水甚至超深水油气田的勘探开发,市场对重入钻孔系统设备的需求量会越来越大,要求也越来越高。而采用主动移船方式进行钻柱重入作业耗时长,成功率低,在超深水的环境中(水深 $> 1500\text{ m}$ ),钻柱近似为柔性杆件,通过移动船只位置的方式移动钻柱很容易受到海况因素制约,往往消耗大量的时间,且需要大量的工作经验。ROV使用成本及使用条件都较为苛刻,而作为同样有助推作

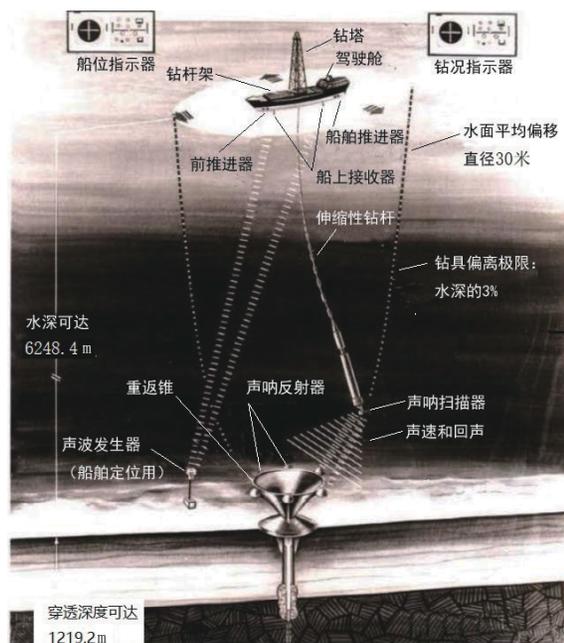


图2 “挑战者号”重入钻孔原理示意

用的水下驱动装置就显得尤为重要。因此,需要对其使用工艺尤其是钻孔重入时间进行深入研究。

### 3 钻柱重入时间计算

在DP定位模式自航模式下,配备驱动装置钻具组合的重入孔口方式如图3所示。

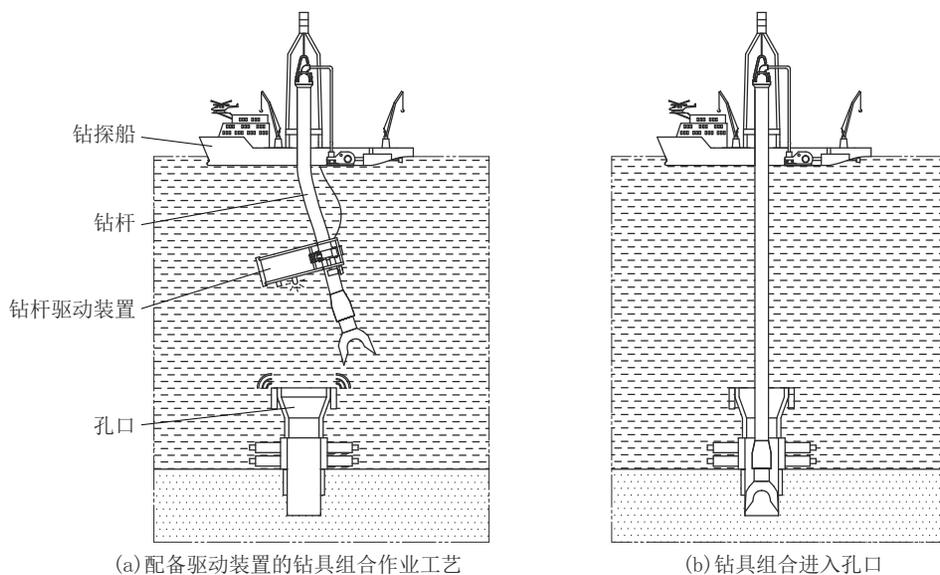


图3 配备驱动装置的钻具组合重入方式示意

#### 3.1 无驱动装置钻柱重入效率

##### 3.1.1 钻柱移动时间计算

钻柱重入总时长 $t$ =移船时间 $t_a$ +稳定时间 $t_s$ ,

悬挂钻柱移船过程如图4。

移船时间 $t_a$ =钻柱移动响应时间 $t_1$ +稳定后移船时间 $t_2$ 。

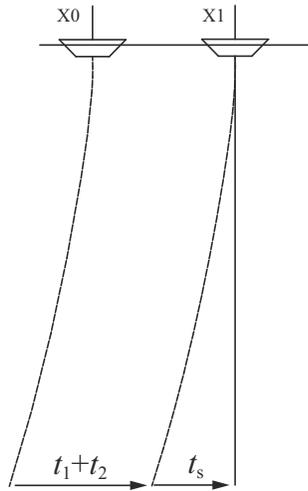


图 4 无驱动钻柱重入时间分析

$$t_1 = 2D_1 \sqrt{\frac{C_D d [L - 3D_1 / (4\varphi)]}{\omega \varphi [L - D_1 / (2\varphi)]}}$$

$$t_2 = \frac{2\%L}{V}$$

3.1.2 稳定时间计算

海洋环境载荷特别是水动力因素的准确描述一直是管柱分析的重点,在海洋钻井设计中通常采用修正 Morison 方程计算水动力载荷:

$$F(z, t) = \frac{\pi}{4} \rho (C_M - 1) D^2 (\dot{u}_w - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}) +$$

$$\frac{1}{2} \rho D C_D (u_w + u_c - \frac{\partial y}{\partial t}) \left| u_w + u_c - \frac{\partial y}{\partial t} \right|$$

式中:  $\frac{1}{2} \rho D C_D (u_w + u_c - \frac{\partial y}{\partial t}) \left| u_w + u_c - \frac{\partial y}{\partial t} \right|$ ——

海流速度引起的拖曳力;  $\frac{\pi}{4} \rho (C_M - 1) D^2 (\dot{u}_w - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2})$ ——海流水质点加速度产生的惯性力;  $C_D$ ——拖曳力系数;  $C_M$ ——惯性力系数;  $\rho$ ——海水密度;  $D$ ——水力直径;  $u$ ——水质点速度;  $\dot{u}$ ——水质点加速度。

拖曳力系数  $C_D$  和惯性力系数  $C_M$  的确定对载荷的影响十分明显,中国船级社 CCS、美国 API 和挪威船级社都对水动力系数做了明确的规定,如表 1 所示。

为保证钻柱强度,船移动时,钻柱与铅垂线的夹角  $\varphi$  始终保持小于  $10^\circ$ ,同时 DP 定位系统的允许船体偏差为水深的 2%,即  $0.02L$ 。钻杆强度边界要求船的速度  $\leq 2.67 \text{ ft/sec}$  ( $0.81 \text{ m/s}$ ),通常取 4 倍安全

表 1 各国规范中水动力计算系数

结构部件	API	中国船级社	挪威船级社
	Stokes 五阶波 (1981)	线性波 (1998)	Stokes 五阶波 (1974)
隔水管			
拖曳力系数	0.6~1.0	1.2	0.5~1.2
惯性力系数	1.5~2.0	2.0	2.0
防喷器			
拖曳力系数	2.0	2.0	—
惯性力系数	2.0	2.0	—

系数,即  $< 0.2 \text{ m/s}$ 。移船至预定位置后钻柱稳定所需时间:

$$\frac{1}{2} W / (L V_0^2) + \frac{1}{4} W_w / (L D_2 \varphi) = \frac{1}{2} C_D d D_c^2 / (t_s^2 D_2)$$

$$t_s = \frac{D_2}{V_0} \sqrt{\frac{D_2}{W_a C_D d + D_2 / 2}}$$

$$D_2 = L \varphi$$

式中:  $W_a$ ——钻柱在空气中悬重, kg ( $10 \text{ N}$ );  $W_w$ ——钻柱浮重, kg ( $10 \text{ N}$ );  $g$ ——重力加速度;  $V_0$ ——移船速度, m/s;  $D_2$ ——响应距离, m,  $D_2 = \min\{0.02L, \tan(10^\circ)L\}$ ;  $C_D$ ——拖曳力系数, 0.7;  $d$ ——钻柱外径, m;  $t_s$ ——稳定所需时间, s。

无驱动装置钻柱重入稳定时间计算结果如表 2 所示。

表 2 稳定时间计算结果

移船速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	水深/ m	钻柱直 径/mm	稳定时 间 $t_s$ /s	钻杆响 应 $t_1$ /s	移船时 间 $t_2$ /s	总时 长/s
0.2	1000	168	120.8	36.4	100	247.2
0.2	3000	168	409.4	65.0	300	774.4
0.2	5000	168	690.0	84.2	500	1274.2
0.2	10000	168	721.1	105.4	1000	1726.5

3.2 驱动装置效率分析

为提高钻柱重入钻孔效率,降低生产成本,在近钻头处增设驱动装置,若底部近钻头处驱动装置的推动力等于底部所受到的水动力,则可以提前控制底部钻头位置,不需要进行移船找孔眼和钻柱稳定,理想状态  $t_a$  和  $t_s$  均为 0 s,如图 5 所示。

在钻柱上增加驱动装置,假设驱动装置安装在钻柱底部,忽略钻柱底部推力导致的摆动时间,能量方程为:

$$\sum \frac{1}{2} W_a V_0^2 + \sum \frac{1}{4} W_w D_2 \varphi - F D_2 = \sum \frac{1}{2} C_D d D_c^2 / (t_s^2 D_2)$$

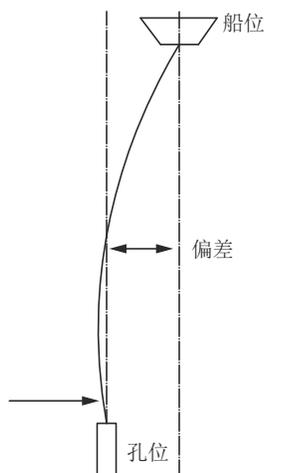


图5 采用返孔驱动装置驱动示意

根据力平衡原理可得到驱动装置所需的推进力:

$$F_x = \sum m_i \ddot{x}_i = 0$$

$$F_y = \sum m_i \ddot{y}_i = 0$$

$$M_z = \sum m_i (x_i \ddot{y}_i - y_i \ddot{x}_i) = 0$$

根据水下推进力计算公式:

推进功率:  $P = FV = \text{通道面积} \times \text{流体密度} \times \text{流速}^3$ 。

推力:  $F = C_n \times \text{通道面积} \times \text{流体密度} \times \text{流速}^2$ ; 螺旋桨  $C_n = 0.8$ 。或者,  $F = \text{螺旋桨直径} \times \text{螺距} \times \text{浆宽度} \times \text{转速}(\text{r/s}) \times \text{大气压力比} \times \text{经验系数}(0.25)$ 。

推力计算结果见表3。

表3 推力计算结果

水深/m	移船速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	所需推力/N	推进功率/W
1000	0.2	2469.1	262.9
3000	0.2	7407.2	740.7
5000	0.2	12345.3	2469.1
10000	0.2	24690.6	4938.1

本算例忽略了驱动装置产生的推力对底部钻柱所带来的动态弯曲和振动,此计算将钻杆简化为杆结构,忽略了底部钻头与船体的夹角影响,底部驱动装置推进功率与船最大航速有关,航速越大驱动装置所需推进功率越大。

从计算结果看,水深越深,近钻头处驱动装置的效果越显著,当水深  $> 5000 \text{ m}$ ,可以节省 20 min 以

上的有效作业时间。

#### 4 结语

钻孔重入系统偏移控制技术是海洋无隔水管钻探作业中的一项关键的技术难点,钻柱偏移控制精准程度直接决定重入钻孔时间长短。通过在钻孔重入系统加装驱动装置,配合系统原有的水下电视模块,可较好的实现钻柱的偏移控制,为钻孔重入系统的推广应用指明方向,利于深海无隔水管钻探技术的发展。

#### 参考文献:

- [1] 中国大洋发现计划办公室. 大洋钻探五十年[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018: 002-003.
- [2] 丁仲礼. 中国大洋钻探二十年[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3866-3867.
- [3] 朱芝同, 刘晓林, 田烈余, 等. 大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 8-15.
- [4] 熊亮, 谢文卫, 卢秋平, 等. 我国深海钻探重入钻孔技术优选及设计思路[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 1-7.
- [5] 叶建良, 张伟, 谢文卫. 我国实施大洋钻探工程的初步设想[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(2): 1-8.
- [6] 李福建, 王志伟, 李阳, 等. 大洋钻探船深海钻探作业模式分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(5): 320-326.
- [7] YANG Lei, QIN Shengjie, JING Chunlei, et al. Construction requirements and function design of China's ocean drilling vessels[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(2): 68-71, 85.
- [8] 李福建, 王志伟, 李阳, 等. 大洋钻探船深海钻探作业模式分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(5): 320-326.
- [9] 赵义, 蔡家品, 阮海龙, 等. 大洋科学钻探船综述[J]. 地质装备, 2019, 20(3): 12-13.
- [10] 王孝山, 褚道余, 崔强. 深水科学钻探钻孔重返系统工艺分析与改进措施[J]. 海洋石油, 2020, 40(1): 74-78.
- [11] 田雪, 赵建亭, 吴雪峰. 大洋勘探船钻探及岩芯采集系统总体设计研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(4): 208-214.
- [12] 陈威冲. 大洋钻探钻孔重返系统技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [13] 赵尔信, 蔡家品, 贾美玲, 等. 我国海洋钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 43-45.
- [14] 田军, 拓守廷. 新十年科学大洋钻探——照亮地球的未来[J]. 自然杂志, 2015, 37(4): 241-242.

(编辑 周红军)