

无隔水管泥浆回收钻井技术控制系统功能设计

陈浩文^{1,3}, 刘晓林^{1,3}, 王林清^{*1}, 于彦江^{2,3}, 田烈余², 王 偲^{2,3}, 殷国乐^{1,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 573199)

摘要:无隔水管泥浆回收钻井技术(RMR)作为双梯度钻井工艺之一,具有绿色环保、井身结构简易、工程成本低和安全程度高等优点。但是RMR作为新兴钻井工艺,虽然国外应用较为成熟,但国内目前尚无工程应用,缺乏相关使用经验。最关键的是RMR控制系统功能复杂,对可靠性、准确性及灵敏性等要求高,面对复杂工况时,要求控制系统能够及时准确的做出应对处理。因此,为发展国内无隔水管泥浆回收钻井技术(RMR),拉近甚至超越国外钻井工艺水平,迫切需要对控制系统做出相对完善的设计。本文针对无隔水管泥浆回收钻井过程中的几类典型工况,分析不同工况下控制系统所具备的功能,设计控制功能具体的实现形式。通过对无隔水管泥浆回收钻井技术控制系统的功能设计与实现的研究,以期今后同类研究提供有益的借鉴。

关键词:无隔水管;海洋钻探;泥浆回收;控制系统;功能设计

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0375-06

Functional design of the control system of riserless mud recovery drilling technology

CHEN Haowen^{1,3}, LIU Xiaolin^{1,3}, WANG Linqing^{*1}, YU Yanjiang^{2,3}, TIAN Lieyu², WANG Cai^{2,3}, YIN Guole^{1,3}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510075, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou Guangdong 573199, China)

Abstract: Riserless mud recovery drilling technology (RMR), as one of the dual gradient drilling techniques, has the advantages of environmental protection, simple well structure, low engineering cost and high safety. However, as an emerging drilling technology, RMR has not seen any engineering application currently in China, and there is a lack of relevant field experience, though it is relatively mature in foreign applications. The most important thing is that the RMR control system has complex functions and high requirements for reliability, accuracy, and sensitivity. When faced with complex working conditions, the control system is required to respond promptly and accurately. Therefore, in order to develop the domestic riserless mud recovery drilling technology (RMR), and to narrow or even surpass foreign drilling technology, there is an urgent need to make a relatively complete design of the control system. In this paper, in light of several typical working conditions in the drilling process with riserless mud recovery, analysis is conducted of the functions of the control system under different working conditions with the design of the specific realization form of the control function. It is desired that the research on the functional design and realization of the control system of the riserless mud recovery drilling technology can provide a useful reference for similar research in the future.

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.063

基金项目:南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“新型无隔水管闭路循环钻井技术研究”(编号:GML2019ZD0501);
中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号:DD20190585)

作者简介:陈浩文,男,汉族,1988年生,工程师,硕士,地质工程专业,主要从事钻探技术、设备及工艺的研发工作,河北省廊坊市金光道77号,409812829@qq.com。

通信作者: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:陈浩文,刘晓林,王林清,等.无隔水管泥浆回收钻井技术控制系统功能设计[J].钻探工程,2021,48(S1):375-380.

CHEN Haowen, LIU Xiaolin, WANG Linqing, et al. Functional design of the control system of riserless mud recovery drilling technology[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):375-380.

Key words: riserless; marine drilling; mud recovery; control system; functional design

0 引言

地球面积的71%被海洋覆盖,海洋也是研究生命起源、地球演化、气候变化等重大科学问题的前沿阵地,蕴含丰富的油气资源,包括未来替代能源“可燃冰”。因此,挺进海洋是历史发展的必然,海洋资源的勘察开发是建设海洋强国战略的迫切需要^[1-2]。

海洋钻探是获取海底地层信息最直观准确的方法,也是海洋资源勘查开发最主要的手段之一。与陆地钻井相比,海洋钻探存在较多技术难题。其中之一是钻井过程中钻井液对钻孔中地层造成的压力需要介于该地层孔隙压力和破裂压力之间,但对于海底地层来说,孔隙压力和破裂压力之间的间隙很小,即钻井液可调的密度窗口小,很难控制钻井液密度安全钻过地层^[3];同时对于无隔水管开路钻井,上返海底井口的泥浆直接排海,这样不但造成海洋环境的污染,同时还造成泥浆的大量浪费。

1 RMR工艺

针对上述问题,双梯度钻井技术应运而生,挪威AGR公司于2001年成功研发无隔水管泥浆回收钻井技术(Riserless Mud Recovery,简称RMR),目前已投入到商业应用超过350口井,是诸多双梯度钻井技术中应用最为成熟的工艺方法^[4-7]。

RMR系统如图1所示,主要包括:泥浆举升泵、泥浆上返管线、吸入模块、脐带缆及绞车、控制系统和动力系统等。RMR技术在钻井过程中不使用隔水管,而采用单独的管线作为泥浆上返的通道,通过泥浆举升泵将海底吸入模块内的泥浆泵送至甲板面固控系统,完成水下井内泥浆的回收利用^[8]。泥浆回收过程中,RMR控制系统通过实时调节泥浆举升泵排量,控制上返泥浆流量,始终维持吸入模块内外压力差为零,达到双梯度钻井的目的。

对于RMR钻井,其井底压力可表示为:

$$P_{\text{RMR}} = 0.0098\rho_1 H_1 + 0.0098\rho_{\text{RMR}}(H_2 - H_1) \quad (1)$$

式中: P_{RMR} ——RMR井底压力,MPa; H_1 ——水深,m; ρ_1 ——海水密度, g/cm^3 ; ρ_{RMR} ——RMR钻井液密度, g/cm^3 ; H_2 ——井总垂直深度,m。

而对于常规钻井,其井眼环空中只有一个液柱梯度,即井底压力由水面到井底的钻井液柱压力来

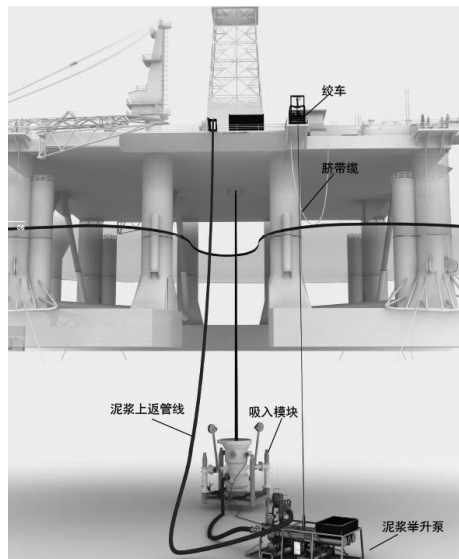


图1 RMR系统组成示意

产生,井底压力表示为:

$$\rho = 0.0098\rho_2 H_2 \quad (2)$$

式中: ρ ——常规钻井井底压力,MPa; ρ_2 ——常规钻井液密度, g/cm^3 。

RMR钻井技术相较于常规钻井技术,其井底静水压力具有两个压力梯度,更便于将井内环空压力维持在海底地层孔隙压力和破裂压力之间。这样可以加深表层套管的下入深度,优化井身结构,降低钻井风险;而且泥浆可完全回收再利用,避免对海洋环境的污染。

2 控制系统需求分析

RMR钻井作业时情况复杂,控制系统是RMR的中枢大脑,它不但需要实时采集RMR系统运行参数,根据反馈的参数实时控制系统各设备运行状态;同时还需要监测突发情况,并具备应急处理能力。下面针对RMR钻井作业中几类典型工况,分析控制系统的功能需求,预防钻井过程中意外情况和事故的发生,保证钻井顺利实施。

2.1 正常钻进工况

正常钻进是RMR控制系统最基本的控制环节。正常钻进时,甲板泥浆泵将泥浆输送至钻杆内,泥浆沿钻杆通道到达井底钻头处,携带钻头切削的

岩屑上返至海底吸入模块内,泥浆举升泵将上返的泥浆及岩屑举升至甲板,完成泥浆的回收作业^[9]。整个作业过程中,吸入模块内泥浆压力要与同水平面外部海水的压力相同。若吸入模块内部泥浆压力大于外部海水压力,则吸入模块内泥浆将会涌出,造成海水污染及泥浆浪费;若吸入模块内部泥浆压力小于外部海水压力,则海水将会涌入吸入模块,稀释泥浆影响性能。所以吸入模块内泥浆压力控制不力会直接影响双梯度钻井的效果。

因此正常钻进时,要求控制系统能够实时监测吸入模块内部泥浆液位,并实时控制举升泵流量,保证泥浆液位在吸入模块内部设定高度范围内动态稳定。

2.2 接钻杆工况

钻进过程中,随着井身不断增加,需要不断地加接钻杆。一般接钻杆时需要停泥浆泵,将新钻杆连接好后再开泵循环,整个过程约5 min左右。由于U型管效应(图2),停泵时,钻杆内相对密度高的泥浆与外部海水压力不平衡,泥浆上返管线内比重高的泥浆与外部海水压力不平衡,泥浆会从吸入模块内外溢^[10];若泥浆举升泵随甲板泥浆泵在接钻杆时暂停,还会发生岩屑沉降堵塞泥浆上返管线以及举升泵。

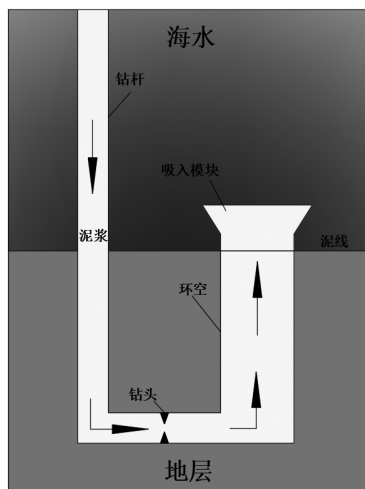


图2 U型管效应示意

因此接钻杆工况时,要求控制系统能够避免因U型管效应造成泥浆外溢和岩屑沉降情况的发生,并且要保证接完钻杆后RMR系统能够迅速正常工作。

2.3 起下钻工况

钻进过程中,由于钻头达到使用寿命、钻孔换径或处理井下事故等原因,需要进行起下钻作业。起下钻过程中,由于钻具提离钻孔或下入钻孔,会造成孔内泥浆液位高度的变化,从而影响井底压力的变化。此外,当钻柱在充满泥浆的井筒中作业时,会产生附加的压力。下放钻柱时会产生附加的激动压力,上提钻柱时会产生附加的抽汲压力。综上在起下钻过程可能会破坏井内的压力平衡,造成井涌、井漏等复杂事故发生^[11]。

因此在起下钻工况时,要求控制系统能够具备控制井底压力及吸入模块泥浆液位的功能,保证安全钻井作业。

2.4 溢流、井涌、井喷工况

钻进过程中,当钻遇高压地层,井底压力小于地层压力时,会发生溢流。钻井溢流不断增大便会形成井涌。当发生钻井溢流和井涌后,若不及时采取措施处理,井涌的量可能会逐步增大,最后发生井喷。

因此当发生溢流或井涌前兆时,控制系统需能够对其进行检测并作出相应判断,指导作业人员进行提前处理,防止事故发生。

2.5 井漏工况

钻进过程中,当井内压力失去平衡,井内压力大于地层压力时,泥浆会在压差的作用下进入地层,形成井漏。井漏包括渗透性滤失、裂缝性滤失、溶洞性滤失等,最直接的表现是上返泥浆量减少甚至失返。

因此当发生井漏前兆时,控制系统需能够准确识别并指导作业人员进行相应处理,防止事故发生。

3 控制系统功能设计与实现

无隔水管泥浆回收系统硬件架构如图3所示,主要包括甲板控制系统和水下测控单元等。其中甲板控制系统包括工作站、甲板通讯机、视频刻录及分配器、控制器、数据存储器和UPS等设备,主要功能为接受水下测控单元传输的信息,处理数据并发送相应指令给甲板泥浆泵、泥浆举升泵及放喷管线等执行设备。水下测控系统包括摄像头和照明灯等视频单元,以及差压传感器、深度+温度传感器、高度+姿态传感器、气测传感器组等检测单元,主要功能为采集水下图像、泥浆液位信息、深度、高度、温度及姿态等信息,为甲板控制系统提供控制依据。

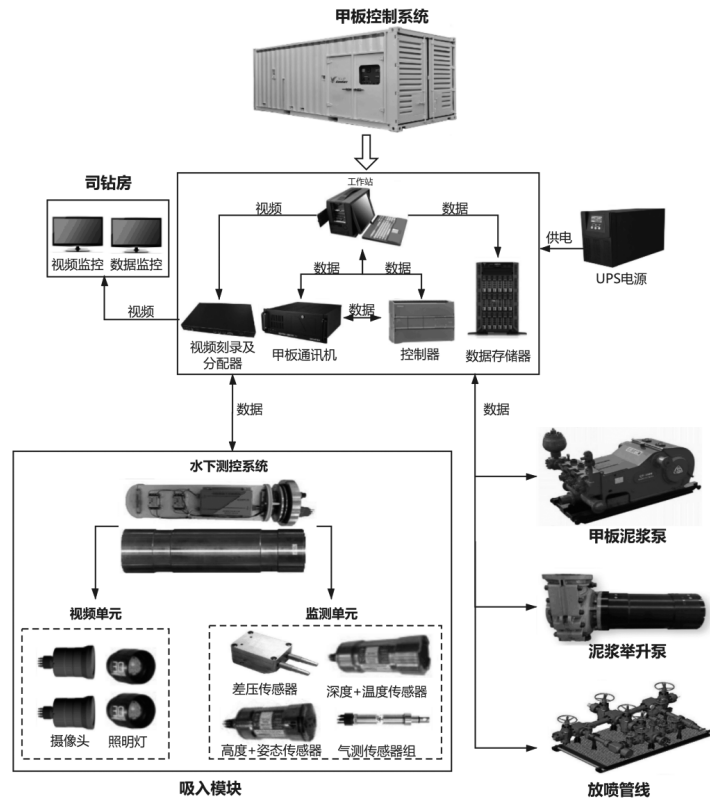


图3 控制系统硬件架构

3.1 正常钻井工况

RMR工艺正常钻进时,吸入模块的液位检测最为重要。由于泥浆与海水相混,诸多物理特性近似,加之海底工况严苛,对吸入模块内的泥浆液位检测造成一定困难,传统的液位检测技术如电极式、浮球式、压力式、超声波式等并不完全适用。根据双梯度钻井原理,在此可通过差压传感器来测量吸入模块内外压差来间接检测吸入模块内的泥浆的液位高度。差压传感器2个探头分别置于吸入模块内外两侧,监测内外压差。如果压差为正(吸入模块内部压力>外部压力),则说明泥浆将要外溢,此时控制系统需提高泥浆举升泵排量,从而降低吸入模块内部泥浆液位高度;如果压差为负(吸入模块内部压力<外部压力),则说明海水将要

涌入吸入模块内,此时控制系统需降低泥浆举升泵排量,从而提高吸入模块内部泥浆液位高度(见图4)。控制器根据压力差值信号,基于相应的控制算法,不断调整举升泵流量,控制压差值基本为零,达到泥浆液位动态稳定的目的^[12]。

3.2 接钻杆工况

接钻杆时,为防止U型管效应泥浆外溢及岩屑沉积,同时考虑到接单根时间较短,若频繁启停泥浆举升泵易造成水下电机故障,控制系统可控制泥浆举升泵不停机小排量运转。当接钻杆时,由于U型管效应,泥浆会从吸入模块外溢。此时控制系统可通过水深、泥浆比重、动切力等参数理论估算出涌出量及涌出速度,控制泥浆举升泵排量与涌出速度匹

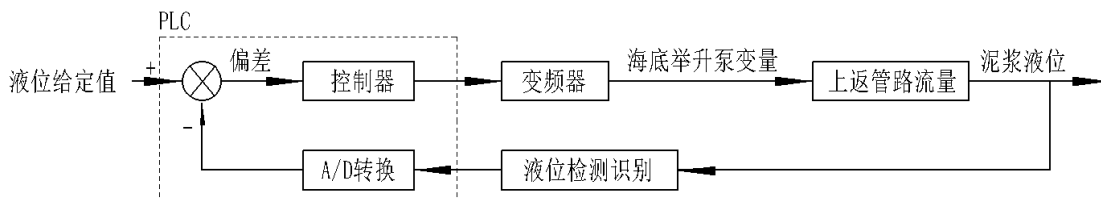


图4 正常钻井工况控制框图

配;当举升泥浆量达到泥浆涌出量时,泥浆举升泵还需继续运转,此时海水将会涌入吸入模块进入泥浆上返管线,控制系统需记录上返的海水量,计算出上返时间自动控制甲板上泥浆返回管汇中的放喷管线阀门,将举升的海水放喷回大海,防止海水混入泥浆池内影响泥浆性能;在控制过程中,控制系统还需通

过吸入模块内的差压传感器或摄像头采集的数据不断修正举升泵排量(见图5)。整个接钻杆过程中,由于泥浆举升泵一直在工作,形成泥浆及部分海水的连续循环,因此不会造成泥浆上返管线内岩屑的沉降堵塞现象。

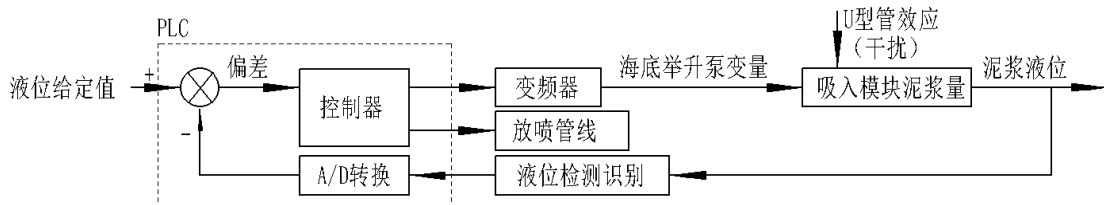


图5 接钻杆工况控制框图

3.3 起下钻工况

起钻过程中,随着钻具的上提,吸入模块内的泥浆液位会逐步下降,此时海水涌入吸入模块。如果井深较深时,此时提离孔底的钻具较多,涌入井内的海水较多,会造成孔底压力减小,易发生溢流或井涌现象,此时控制系统在起钻过程中,需控制甲板泥浆泵注入适量泥浆,保证井内的压力平衡。如果井深较浅时,此时提离孔底的钻具较少,涌入井内的海水较少,对孔内压力影响较少,此时可无需注入泥浆。当钻具提离吸入模块时,钻杆内的泥浆会随着钻具的上提从钻具底部钻头处溢出,对海水造成污染。因此在钻具即将提离吸入模块前,需暂停起钻,进行钻杆内泥浆的顶替回收。此时控制系统需控制甲板泥浆泵往钻杆内注入海水来顶替泥浆,同时启动泥浆举升泵将顶替出的泥浆回收至甲板面。此时控制系统需根据水下钻具长度、泥浆比重等参数计算出需要顶替的泥浆量,同时还需控制甲板泥浆泵量与泥浆举升泵量相同。

下钻过程中,钻柱内充满海水,若钻杆直接进入孔内开始钻进,此时钻柱内的海水会进入到孔内,稀释孔内泥浆,降低孔底压力,易引发溢流或井涌等事

故。因此在下钻过程中,钻柱即将进入吸入模块内时,需停止下钻,控制系统需控制甲板泥浆泵往钻杆内注入泥浆,控制系统需根据钻柱长度计算出泥浆注入量,也可根据吸入模块内的摄像头观察吸入模块有泥浆溢出时,即可停止泥浆的注入。当钻柱进入孔内时,泥浆液位会随着钻柱的下入而上升,此时控制系统需根据吸入模块内传感器反馈的数据,控制泥浆举升泵的举升流量,保证泥浆不会溢出吸入模块外(见图6)。

3.4 溢流、井涌、井喷工况

当发生溢流或井涌时,地层中的流体会涌入井内。此时控制系统可根据吸入模块内泥浆液位的上涨以及泥浆举升泵流量的不断变大来判断是否发生溢流或井涌现象^[13]。若判断发生溢流或井涌时,控制系统需报警并进行应急处理,如同时控制甲板泥浆泵及泥浆举升泵快速注入加重泥浆进行压井等。若井涌未控制住发生井喷时,此时控制系统需及时切换泥浆返回管汇中的放喷阀门,将上返的泥浆放喷回海水,防止井喷出的有毒流体到达甲板面,危害人员安全(见图7)。待泥浆上返管线中的泥浆及岩屑被海水顶替完毕后,控制系统可停止泥浆举升泵作业。

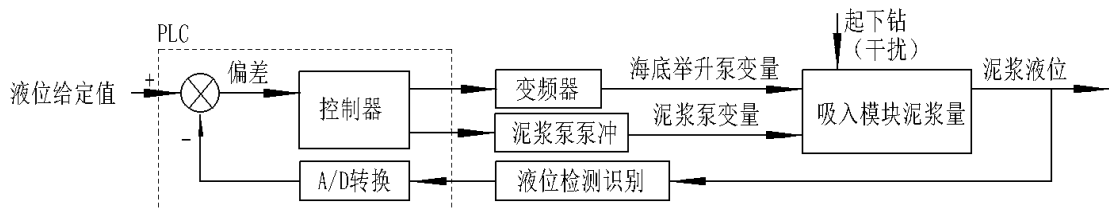


图6 起下钻工况控制框图

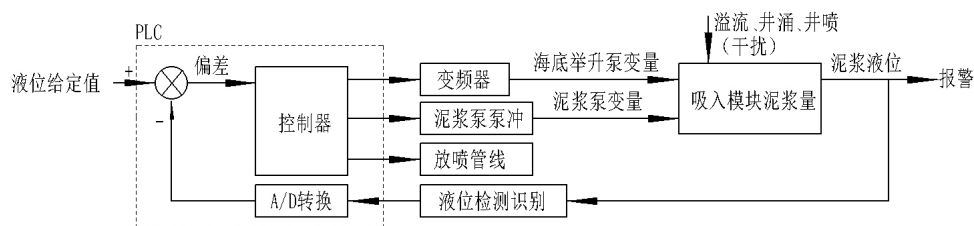


图7 溢流、井涌、井喷工况控制框图

3.5 井漏工况

当发生井漏时,孔内的泥浆会流入地层中,导致孔内泥浆减少。控制系统可通过监测吸入模块内泥浆液位的下降及泥浆举升泵流量的不断减小来判断

是否发生井漏现象(见图8)^[14-15]。若发生井漏现象,控制系统可通过吸入模块内泥浆液位的下降速率来评估井漏的严重程度,并告知操作人员进行相应处理。

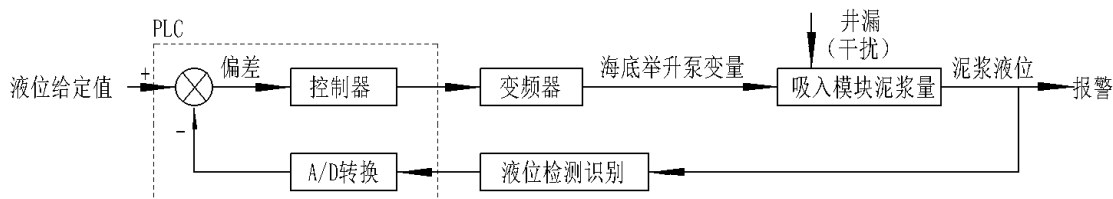


图8 井漏工况控制框图

4 结语

(1)RMR工艺研究之初是为降低油气井表层钻井风险,精简井身结构,降低建井成本等,大多数应用于浅水海域。随着近年来科学技术的发展,泥浆举升泵、控制系统、泥浆上返管线等关键设备能力不断地提升,使RMR工艺应用于深海成为了可能。因此RMR应用领域可拓展到天然气水合物钻探、大洋科学钻探等,应用前景广泛。

(2)RMR技术作为新兴钻井工艺,虽然国外应用较为成熟,但国内目前尚无工程应用,缺乏相关使用经验。RMR控制系统功能复杂,对可靠性、准确性及快速性等要求高。因此在RMR控制系统后续研发中,除了本文通过各工况在原理上进行控制需求分析及设计外,后续还需结合实际钻探工况、人员操作及井控安全等方面进行统筹考虑、完善优化。

参考文献:

- [1] 李丽松,苗琦.天然气水合物勘探开发技术发展综述[J].天然气与石油,2014,32(1):67-71,11-12.
- [2] 吕福亮,贺训云,武金云,等.全球深水油气勘探简论[J].海相油气地质,2006(4):22-28.
- [3] 陈国明,殷志明,许亮斌,等.深水双梯度钻井技术研究进展[J].

石油勘探与开发,2007(2):246-251.

- [4] 葛瑞一.无隔水管钻井泥浆举升系统设计与控制单元研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2013.
- [5] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.
- [6] 徐群.海底泥浆举升钻井系统吸入模块样机研究与开发[D].青岛:中国石油大学,2011.
- [7] 王德,谢文卫,张伟,等.RMR技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.
- [8] 王国栋,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管泥浆举升钻井系统配置及安装流程[J].石油矿场机械,2012,41(11):11-15.
- [9] 王国栋.深水钻井泥浆举升装置系统设计与监控策略研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.
- [10] 李基伟,柳贡慧,李军,等.深水海底举升钻井系统U型管效应研究[J].中国海上油气,2016,28(2):120-127.
- [11] 余骅.起下钻过程中引发的井筒波动压力研究[D].成都:西南石油大学,2014.
- [12] 何新霞,闫加亮,徐长航.海底钻井液举升钻井系统监测与控制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(3):129-134.
- [13] 纪永强.深水钻井井控风险定量评价方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2014.
- [14] 王建彬.石油钻井工程事故的预警技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [15] 张鹏飞.深水海底泥浆举升钻井系统风险评价与控制[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.