

基于图像识别的深海RMR液位测控系统设计研究

高洁云^{1,2,3}, 陈浩文^{1,2,3}, 秦如雷^{1,2,3}, 刘晓林^{1,2,3}

- 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;
- 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 573199;
- 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 河北廊坊 065000)

摘要: 无隔水管泥浆循环钻井(RMR)是一种新兴的绿色环保钻井技术,旨在解决没有泥浆循环通道的开放水域钻井中泥浆排放带来的材料损耗和环境污染等问题。创新的泥浆循环液位测控系统解决了开放水域钻井浑浊视域下泥浆-海水交融区域界面识别难题。泥浆循环液位测控系统由泥浆液位测算系统与泥浆液位控制系统组成,首先将收集的井口泥水图像传输至泥浆液位测算系统得到测算泥浆液位,然后基于测算泥浆液位与预设泥浆液位的偏差,利用泥浆液位控制系统自动调节泵量,使井口液位维持在预设水平。通过搭建陆地测试试验台进行试验,验证了RMR液位测控系统能够较为准确地识别井口液位并且自动控制泵的流量,能够自动应对井涌与井漏等状况,整体性能可靠,实现了深海钻探技术装备的原始创新。

关键词: RMR; 图像识别; 液位测算; 液位控制; PID控制

中图分类号: P634.3; TE92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0252-06

Design and research of deep-sea RMR liquid level identification and control system based on image recognition

GAO Jieyun^{1,2,3}, CHEN Haowen^{1,2,3}, QIN Rulei^{1,2,3}, LIU Xiaolin^{1,2,3}

- Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
- Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou Guangdong 511458, China;
- Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Riserless mud recovery drilling (RMR) is an emerging green and environmentally friendly drilling technology aimed at solving the problems of material loss and environmental pollution caused by mud discharge in open water drilling without mud recovery channels. The innovative mud recovery liquid level identification and control system solves the problem of identifying the interface between mud and seawater in the turbid field of open water drilling. The system consists of the mud level identification system and mud level control system. Firstly, the collected images of mud and seawater are transmitted to the mud level identification system to obtain the measured mud level. Then, based on the deviation between the measured mud level and the preset mud level, the mud level control system is used to automatically adjust the pump volume to maintain the wellhead mud level at the designed level. By building the land testing platform for experimentation, it has been verified that the RMR liquid level identification and control system can accurately identify the mud level and automatically control the pump flow rate, and can automatically respond to well kick and leakage. The overall performance of the system is reliable, achieving the original innovation of deep-sea drilling technology equipment.

Key words: RMR; image recognition; mud level identification; mud level control; PID control

收稿日期: 2024-08-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.038

基金项目: 国家重点研发计划项目“深海开路泥浆液位闭环控制系统研制”(编号: 2021YFC2800802)

第一作者: 高洁云, 女, 汉族, 1996年生, 助理工程师, 机械工程专业, 硕士, 从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 775726390@qq.com。

引用格式: 高洁云, 陈浩文, 秦如雷, 等. 基于图像识别的深海RMR液位测控系统设计研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 252-257.

GAO Jieyun, CHEN Haowen, QIN Rulei, et al. Design and research of deep-sea RMR liquid level identification and control system based on image recognition[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 252-257.

0 引言

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,海洋钻井存在较多技术难题,其中之一是井口与钻井平台(钻探船)之间有大段的海水相隔,从井口返回的泥浆不能直接进入钻井平台上的泥浆池。特别是对于海洋地质勘查或大洋钻探等开路钻井工况,泥浆直接排放入海里,不仅造成海洋环境污染,还会导致泥浆消耗量巨大。为了解决开路钻井无法循环泥浆的问题,挪威AGR Subsea公司研制了无隔水管泥浆循环钻井技术(Riserless Mud Recovery,简称RMR)^[1]。无隔水管泥浆循环钻井技术作为一种新兴钻井技术,其在全球范围内的应用已从浅海走向了深海。国内对于无隔水管泥浆循环钻井工艺与装备系统的研究起步较晚,广州海洋地质调查局、中国地质科学院勘探

技术研究所等科研院所将该技术从实验室研究推向大洋科学钻探、天然气水合物钻探等实际应用场景^[2-4],联合主导了多项无隔水管泥浆循环钻井技术和装备系统研究项目,并且开展了与现有RMR设备的设计思路不同的深海泥浆举升系统、开放水域泥浆-海水界面测控系统、柔性连续泥浆返回管道等主要设备原型的研发。

1 无隔水管泥浆循环系统组成

实现开放水域无隔水管泥浆循环钻井的装备体系复杂,按布放位置可分为水上单元和水下单元^[5]。其中水上单元由强弱电闭环协同控制系统、水下设备布放设施等组成;水下单元由泥水界面测控系统、泥浆举升泵组和泥浆上返管道等部分组成;各子单元对应功能详见表1。无隔水管泥浆循环系统各设备布置如图1所示。

表1 无隔水管泥浆循环系统组成

主单元	子单元	主要功能
水上单元	强弱电闭环协同控制系统	系统供电、水下泵供电、动力电升压和控制泵量
	水下设备布放设施	强弱电供能线缆布放与水下单元布放
	泥浆泵	为水下钻井提供质量稳定的泥浆
水下单元	泥浆循环液位测控系统	开放水域泥浆液位识别与控制
	泥浆举升泵组	泥浆举升执行机构
	泥浆上返管道	提供泥浆返回通道、与脐带缆耦合连接和连接海底锚张紧补偿

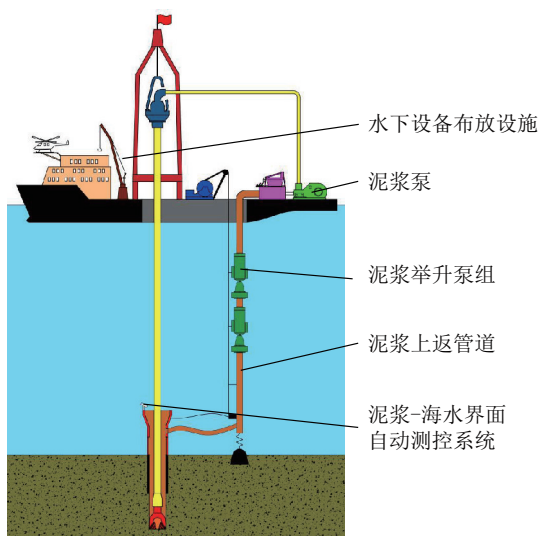


图1 无隔水管泥浆循环系统各设备布置

水上单元与水下单元协同工作,共同完成无隔水管情况下的深海钻井工作。其中,泥浆循环液位

测控系统是测量与控制井口泥浆液位的重要一环,负责监控海底泥浆液位是否处于正常水平或者是否发生井涌或井漏等状况,当发现井口状况异常时,测控系统应及时报警并自动控制泵组对泵量做出相应调整。

2 泥浆循环液位测控系统

泥浆循环液位测控系统是实现无隔水管泥浆循环钻井的关键,其主要功能是检测识别开路井口泥浆液面和对泥浆泵与泥浆举升泵进行变量控制。因为井口处于开放水域,海水与泥浆直接接触,且海底能见度很低,所以泥浆循环液位测控系统的主要技术难题是在开放水域浑浊视界环境下准确识别井口中泥浆-海水界面的位置与其动态变化规律,以及根据界面动态变化实时调节泵量使泥浆液位维持在稳定状态。

2.1 泥浆液位测算系统

针对泥浆-海水界面的识别难题,我们设计了基于图像识别技术的泥浆液位自动识别方法,以该方法为底层逻辑研发的泥浆液位测算系统对泥浆密度不敏感,可应用在全井段钻井中。

该测算系统由井口吸入模块、摄像机、光源和图像识别系统组成,摄像机的信号输出端与图像识别系统连接,摄像机用于拍摄包含光源照射下的井口吸入模块顶部敞口和井口吸入模块内部待测液体液面的液位检测图像,并将液位检测图像传输至图像识别系统。图像识别系统原理详见图2,泥浆的液位越高,距离摄像头越近,摄像机所拍摄到的泥浆区域越大,通过仿真和实验建立起泥浆区域面积和泥浆液位的关系,就能够来判断泥浆的液位。

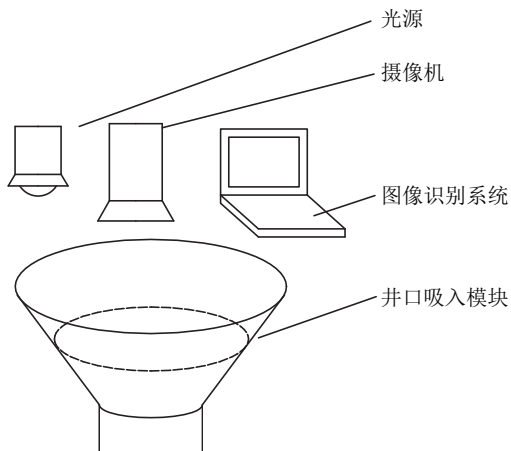


图2 图像识别系统原理

YOLO(You Only Look Once)是一种实时目标检测算法,它通过单次前向传递直接预测目标的类别和边界框。YOLO是将目标检测作为单一统一的过程,利用整张图像作为网络的输入对象,直接在输出层回归结果,而不是将其分成多个阶段,这使其非常高效,适用于实时应用。图像识别系统使用YOLO-v3模型对摄像机输入的液位检测图像进行计算^[6-8],输出井口吸入模块顶部敞口的外接矩形的位置坐标和待测液体液面的外接矩形的位置坐标,根据两个外接矩形的位置坐标和井口吸入模块的尺寸参数,即可确定待测液体的液位。

泥浆液位图像识别系统中算法如图3所示,矩形图片左上角为原点 O ,坐标为 $(0,0)$ 。

关于泥浆液位计算公式如下:

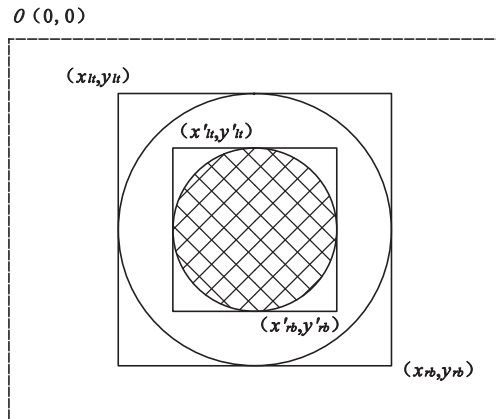


图3 泥浆液位图像识别算法

$$\gamma = \frac{r}{R} = \left(\frac{x'_{rb} - x'_{lt}}{x_{rb} - x_{lt}} + \frac{y'_{rb} - y'_{lt}}{y_{rb} - y_{lt}} \right) / 2 \quad (1)$$

$$h = R \times \gamma \times \frac{1}{\tan \alpha} = R \times \left(\frac{x'_{rb} - x'_{lt}}{x_{rb} - x_{lt}} + \frac{y'_{rb} - y'_{lt}}{y_{rb} - y_{lt}} \right) / 2 \times \frac{1}{\tan \alpha} \quad (2)$$

式中: r ——液位半径,mm; R ——井口吸入模块顶部敞口的半径,mm; γ ——液位半径与井口吸入模块顶部敞口半径的比值;无量纲; x_{lt} ——井口吸入模块顶部敞口的外接矩形左上角横坐标,无量纲; y_{lt} ——井口吸入模块顶部敞口的外接矩形左上角纵坐标,无量纲; x_{rb} ——井口吸入模块顶部敞口的外接矩形右下角横坐标,无量纲; y_{rb} ——井口吸入模块顶部敞口的外接矩形右下角纵坐标,无量纲; x'_{lt} ——待测液体液面的外接矩形左上角横坐标,无量纲; y'_{lt} ——待测液体液面的外接矩形左上角纵坐标,无量纲; x'_{rb} ——待测液体液面的外接矩形右下角横坐标,无量纲; y'_{rb} ——待测液体液面的外接矩形右下角纵坐标,无量纲; h ——待测液位高度,mm; α ——井口吸入模块圆锥母线与高的夹角, $(^\circ)$ 。

因为 R 是已知的,故可求得液位高度 h 。

液位测算系统通过高相关性数据分析方法确立。首先,开展泥浆循环试验,记录实验过程中的液位检测图像与实际液位高度等数据,对大量的试验数据通过机器学习或深度神经网络训练等方法得到关于泥浆液位的图像识别算法模型,搭建基于图像识别的泥浆液位测算系统。

2.2 泥浆液位控制系统

在液位测算系统的基础上,再利用泥浆液位控

制系统自适应控制泵的流量,从而实现对泥浆液位的精确控制。泥浆液位控制算法框图如图 4 所示,利用自适应 PID 参数对测算液位和设定液位的偏

差进行反馈控制,调节变频器的频率,从而控制泥浆泵和举升泵的流量,使得泥浆液位维持在设定液位附近。

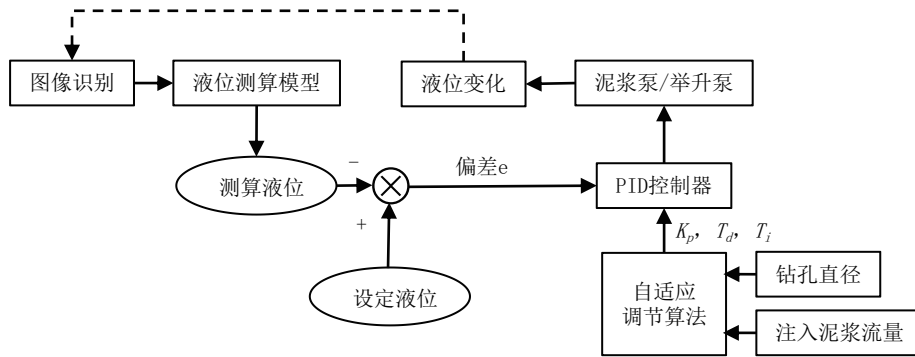


图 4 泥浆液位控制算法

PID 控制输出公式如式(3)所示:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

$$e(t) = n(t) - y(t) \quad (4)$$

传递函数公式:

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (5)$$

式中: $y(t)$ ——系统的输出; $n(t)$ ——给定值; $e(t)$ ——控制的输入,即偏差; $u(t)$ ——控制的输出; K_p ——比例系数; T_i ——积分时间常数; T_d ——微分时间常数。

式(3)、(4)及(5)中各个参数具有各自的作用:增大比例系数 K_p , 泥浆液位变化的反应速度将会提高;增大积分时间常数 T_i 有助于减小震荡幅度,降低控制超调量,从而提高系统的稳定性,但也将导致系统达到理想液位输出量的时间延长;微分时间常数 T_d 可以反映液位偏差的变化速度,一定程度上预测下一时刻泥浆液位的变化量,有利于改善系统的动态特性。在实际工作过程中,系统特性受到钻孔直径、泥浆流量、上返管线等因素影响,最佳的 PID 参数也会随之变化,因此,需要通过实验得到不同条件下对应的最佳 PID 参数,据此自适应地调节参数,实现泥浆液位的稳定控制。

为了使泥浆循环系统能够安全运行,在泥浆液位控制系统的自动控制模式外,还增加了手动控制模式。在手动控制模式下,可通过手动任意进行泥浆泵与举升泵的泵量调节;当出现突发状况或需要手动越权操作时,可通过井口实时摄像机画面直接

观测井口泥浆液面情况,对泵量进行手动控制。液位控制模式与控制策略见表 2。

表 2 液位控制模式与控制策略

控制模式	输入条件	控制策略
手动模式	—	通过上位机软件直接设置泥浆泵与举升泵的泵量,优先级最高,实现手动越权、突发状况下的应急操作
自动模式	液位检测 图像	基于图像采集数据,经处理后得到泥浆液位数据,作为自动控制的输入条件,通过自适应控制模型与算法,实现泵流量自动调节

2.3 对于井涌和井漏的动态检测与应对方法

当发生溢流、井涌(井喷)时,地层中的流体会涌入井内,此时系统会收到液位测算系统发出的液位数值不断增大的信号,据此判断发生溢流或井涌现象。当判断发生溢流或井涌时,液位测控系统发出警报,同时控制甲板泥浆泵减小泵量与泥浆举升泵增大泵量。若井涌未控制住发生井喷时,此时液位测控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(图 5)。待泥浆上返管线中的泥浆及岩屑被海水顶替完毕后,液位测控系统可停止泥浆泵与举升泵作业。

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,此时系统会收到液位测算系统发出的液位数值不断减小的信号,据此判断发生井漏现象(图 6)。当判断发生井漏现象时,液位测控系

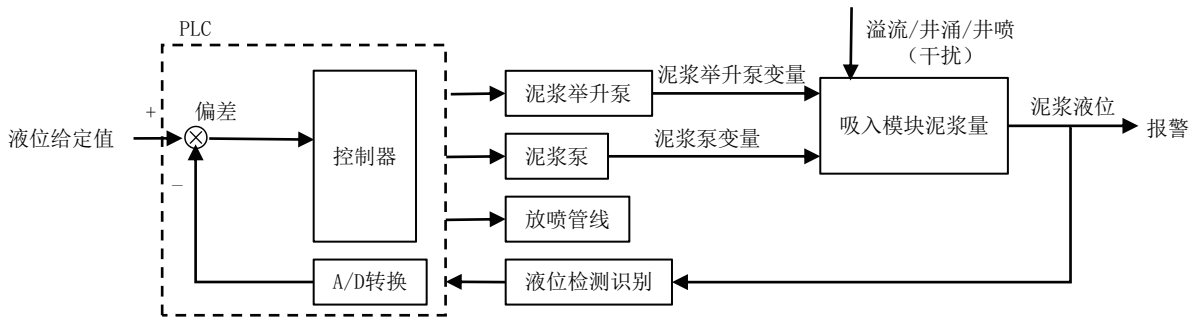


图5 溢流/井涌/井喷工况控制

统发出警报,同时控制泥浆举升泵减小泵量,并告知操作人员进行相应处理。

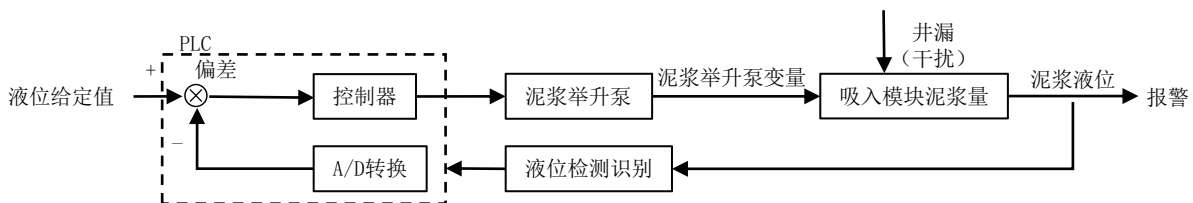


图6 井漏工况控制

3 液位测控系统测试

将照明灯、摄像头、吸入模块、泥浆举升泵、泥浆泵、上位机和循环管汇等设备连接起来,搭建成陆地测试试验台,如图7所示,进行基于图像识别的无隔水管泥浆循环液位测控系统测试,验证泥浆循环液位测控系统对于泥浆液位的测算与控制的准确性与实时性。在利用泥浆循环液位测控系统检测并控制井口液位时,同时使用备用摄像机通过目视持续观察井口吸入模块内泥浆液位的变化情况。

首先通过泥浆泵将泥浆注入至吸入模块内,然后通过举升泵撬块将吸入模块内的泥浆举升回收至泥浆罐,待整个泥浆循环过程趋于稳定,井口吸

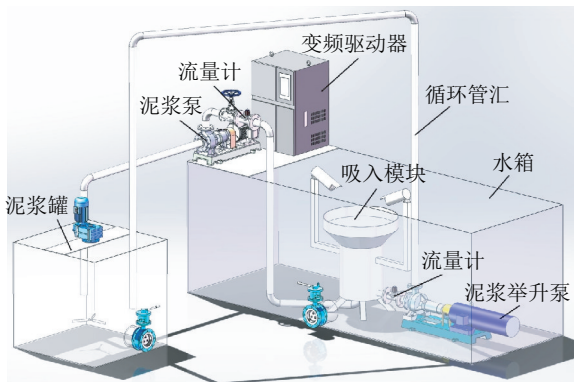


图7 液位测控系统陆地试验台

入模块中的液位达到预设位置且基本保持不变,此时摄像头收集海水-泥浆界面图像,传输至泥浆循环液位测控系统处理,系统判断此时泥浆循环达到稳定循环状态。接下来调大泥浆泵泵量,模拟井涌突发状态,此时吸入模块内泥浆液位快速上升,泥浆溢出井口,摄像头收集井口泥水界面图像并传输至测控系统,系统判断井口发生井涌状况并发出警报,同时控制甲板泥浆泵减小泵量与泥浆举升泵增大泵量,使井口液位下降,直至恢复到预设位置,并达到稳定循环状态。调小泥浆泵泵量,模拟井漏状况。此时吸入模块内泥浆液位快速下降,海水灌入井口,此时测控系统会判断发生井漏状况并进行报警,同时控制泥浆举升泵减小泵量,并通知操作人员进行相应处理。泥浆液位测控试验过程如图8所示。

通过多次试验,不断优化泥浆循环液位测控系统中的参数,提高液位测控的准确度与敏捷度。试验表明:基于图像识别的泥浆循环液位测控系统不管是对井漏工况还是对井涌工况,都能够及时地进行识别并控制泵量做出相应调节,最终使泥浆液位逐渐恢复至稳定循环状态。

4 结论

本文对基于图像识别的深海无隔水管泥浆循

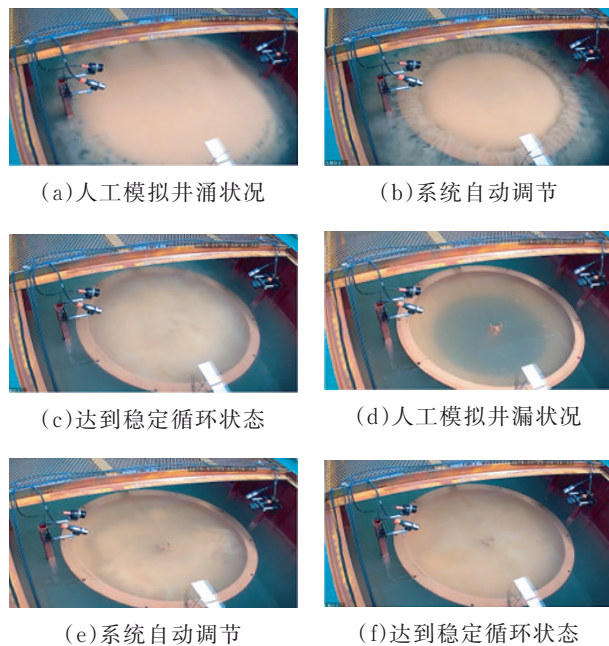


图8 泥浆液位测控试验过程

环液位测控系统的设计思路进行了详细阐述,并通过试验对上述设计思路进行了验证,主要得出以下结论:

(1)无隔水管泥浆循环钻井技术能够有效减少开路钻井的泥浆损耗,为不具备隔水管的钻井船提供一种新的选择。

(2)基于图像识别的泥浆循环液位测控系统能够准确识别液位并自动调节泵量,以维持液位保持在稳定状态。

(3)后续可开展不同泥浆流量与泥浆浓度的重复试验,获取更多的试验数据来训练泥浆液位测算模型与泥浆液位控制模型,不断优化模型参数,从而扩大液位测控系统的应用场景,提高识别准确度和响应速度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王嘉瑞,秦如雷,冯起赠,等.大洋钻探井口吸入模块设计与模态分析[J].钻探工程,2023,50(6):45-55.
- [4] 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.
- [5] Li X, Zhang J, Tang X, et al. Study on wellbore temperature of riserless mud recovery system by CFD approach and numerical calculation-ScienceDirect[J]. Petroleum, 2020, 6(2):163-169.
- [6] Kou X, Liu S, Cheng K, et al. Development of a YOLO-V3-based model for detecting defects on steel strip surface[J]. Measurement, 2021(1-4):109454.
- [7] Clark L G, Velten V J. Image characterization for automatic target recognition algorithm evaluations [J]. Optical Engineering, 1991,30(2):147-153.
- [8] Yao Z, Song X, Zhao L, et al. Real-time method for traffic sign detection and recognition based on YOLOv3-tiny with multi-scale feature extraction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021,235(7):1978-1991.

(编辑 王文)