

中文引用格式:盛磊祥,殷志明,李彦伟,等.深水隔水管多功能悬挂系统及海试效果评估[J].中国安全科学学报,2026,36(1):97-103.

英文引用格式:SHENG Leixiang, YIN Zhiming, LI Yanwei, et al. Multifunctional suspension system for deepwater drilling riser and evaluation of its application in sea trial[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 97-103.

深水隔水管多功能悬挂系统及海试效果评估^{*}

盛磊祥^{1,2}高级工程师,殷志明²教授级高级工程师,李彦伟³,刘秀全³教授,
王金龙²高级工程师,郭卫华⁴高级工程师

(1 海洋石油高效开发研究中心,北京 102209;2 中海油研究总院有限公司 钻采研究院,
北京 100028;3 中国石油大学(华东)机电工程学院,山东 青岛 266580;
4 中海油田服务股份有限公司 钻井事业部,河北 三河 065201)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0195

资助项目:国家科技重大专项项目(2025ZD1403202);中国海油综合科研项目(KJGJ-2023-0002);国家科技部重点
研发计划项目(2022YFC2806500)。

【摘要】 为降低深水钻井隔水管在恶劣海况下的动态载荷,提升深水钻井隔水管对复杂海况的适应能力,提出一种包含悬挂、液压补偿和测控的深水隔水管多功能悬挂系统,以应对南海台风等恶劣海况条件下悬挂隔水管的安全风险。通过特制的悬挂单根承载隔水管系统,并借助扶正器和铰接接头缓解隔水管顶部的弯曲载荷;研制液压补偿系统,采用差动节流补偿、被动非节流补偿和节流屏蔽3种工作模式,以满足避台风、井间移位等作业需求;测控系统实时监测和预警,调控中空式液压缸的伸缩运动,实时补偿隔水管系统动载。该系统在南海完成海试应用,应用效果评估表明:隔水管多功能悬挂系统能够显著降低隔水管顶部应力和动态载荷,尤其是差动节流补偿与被动非节流补偿模式;海试期间应用该系统,钻井船悬挂隔水管顺流和逆流的航速均提升至1.0 km,显著提高了作业效率。

【关键词】 深水隔水管; 多功能悬挂系统; 补偿模式; 测控系统; 对中装置

Multifunctional suspension system for deepwater drilling riser and evaluation of its application in sea trial

SHENG Leixiang^{1,2}, YIN Zhiming², LI Yanwei³, LIU Xiuquan³, WANG Jinlong², GUO Weihua⁴

(1 Offshore Oil Efficient Development Research Center, Beijing 102209, China; 2 Drilling &
Production Research Department, CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China;
3 School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China),
Qingdao Shandong 266580, China; 4 Drilling Department, China Oilfield Services
Limited, Sanhe Hebei 065201, China)

Abstract: In order to reduce the dynamic loads on risers under harsh sea conditions and enhance their adaptability to complex marine environments, a multifunctional suspension system for deepwater riser was proposed, which included a suspension system, a hydraulic compensation system, and a measurement and

control system, in order to ensure the safety of the suspended riser under severe sea conditions such as typhoons in the South China Sea. In addition, the system can also be applied to transit with a suspended riser between wells, which can significantly reduce the load of the suspension riser. The suspension system suspends a single bearing riser system, and relieves the stress concentration on the top of the riser by means of a centralizer and a hinge joint; the hydraulic compensation system adopts three working modes of differential throttling compensation, passive non-throttling compensation and throttling shielding to meet the requirements of platform avoidance and inter-well transit. The measurement and control system monitors and warns in real time, regulates and controls the telescopic movement of the hollow hydraulic cylinder, and realizes the real-time compensation of the dynamic load of the riser system. The system has undergone sea trial applications, the results show that the proposed multi-function suspension system can significantly reduce the riser top stress and dynamic load amplitude, especially in the differential throttle compensation and passive non-throttle compensation modes. At the same time, the downstream and upstream speeds of the platform are increased to 1.0 knots, which significantly improves the operation efficiency. The system helps to overcome the challenge of traditional suspension mode, provides a safe and efficient solution for deepwater drilling riser operations, and reduces the disaster risk of suspension riser under extreme sea conditions such as typhoons.

Keywords: deepwater riser; multifunctional suspension system; compensation mode; measurement and control system; centralizer devise

0 引言

中国南海油气资源丰富,是我国油气勘探与开发的重点区域^[1-4]。南海海域环境复杂且台风频发,严重威胁油气勘探开发装备的安全,尤其是深水隔水管系统^[5-6]。常规深水作业避台方案时间长,作业繁琐,严重影响钻完井时效,钻井船无法按照常规的避台策略,回收所有隔水管并撤离^[7-8]。因此,悬挂隔水管已成为避台作业中不得不考虑的备用应急方案。

隔水管的悬挂模式分为软悬挂与硬悬挂^[9-12]。国内外许多学者针对这2种隔水管悬挂模式的安全性和避台措施开展了研究。认为硬悬挂模式下,隔水管系统随着平台升沉,动载幅值较大,软悬挂模式可以补偿平台升沉产生的动载荷,因此,软悬挂在安全性上更具优势。但传统的软悬挂模式需要借助钻井隔水管张力器,操作流程复杂且张紧器的行程有限,不能满足恶劣海况下的升沉补偿需求,因此,并未得到广泛应用。

鉴于此,笔者拟提出一种深水隔水管多功能悬挂系统方法,设计相关悬挂系统以降低隔水管恶劣海况下的应力水平,研发液压补偿系统与测控系统以减小隔水管动态载荷,并通过海试验证隔水管多功能悬挂系统的效果,显著提升悬挂隔水管对恶劣海况的适应能力,以确保隔水管系统在遭遇台风等

恶劣海况时运行安全。

1 多功能悬挂系统总体方案设计

深水隔水管多功能悬挂系统的总体设计方案如图1所示。该系统主要由悬挂系统、液压补偿系统和测控系统3部分构成。悬挂系统通过铰接接头与隔水管系统连接,能够有效缓解隔水管顶部的弯曲应力;同时,借助对中装置减少隔水管与月池之间的干涉风险,从而显著提升作业过程中的安全性。液压补偿系统采用中空式液压缸来承载悬挂系统与隔水管系统之间的相互作用力。测控系统则通过实时监测悬挂系统与隔水管系统的运行状态,依据实时数据判断液压补偿系统的工作模式,并精确控制液压缸的伸缩运动,以精准补偿隔水管系统动载荷。在常备状态下,悬挂系统与液压缸组成一个整体,具备快速响应与高效安装能力,显著提高了安装作业的效率。

2 多功能悬挂系统

悬挂系统是一种由特制的悬挂单根、锁紧装置、对中装置、防磨衬套和铰接接头等组件组成的机械结构。悬挂单根采用变截面设计,整体分为上、中、下3段。悬挂单根的上部设计为细长结构,以便穿过中空式液压缸,并通过锁紧装置支撑在活塞杆上。中部为较粗的结构体,安装了对中装置(图2),有效

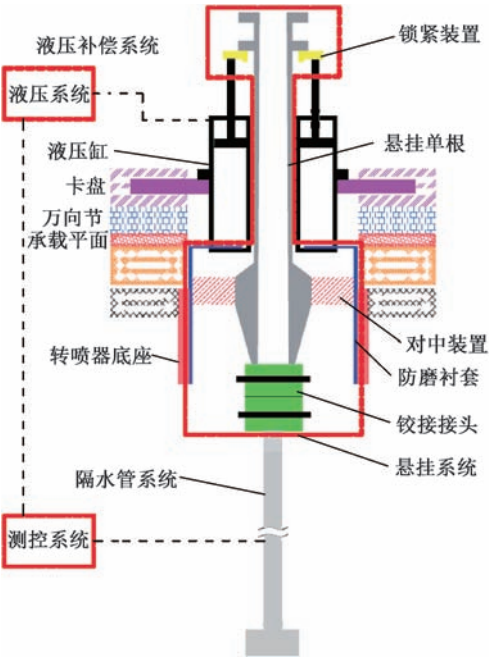


图 1 深水隔水管多功能悬挂系统

Fig. 1 Deepwater riser multi-function hang-off system

减小悬挂单根对液压缸活塞杆施加的横向力。下部设计为具有锥度的结构体,底端通过铰接接头与隔水管系统连接。铰接接头为双轴接头(图 3),由一个扭转的 H 型连杆轴与转喷器过渡接头组成。H 型连杆的上端与悬挂单根连接,下端与法兰连接,法兰用于与隔水管系统连接。铰接接头在承受隔水管系统动载荷的同时,能够有效释放隔水管的弯矩。

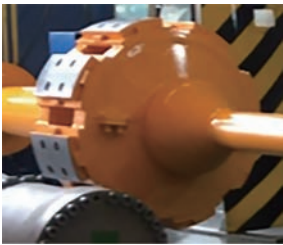


图 2 对中装置

Fig. 2 Centralizer



图 3 铰接接头

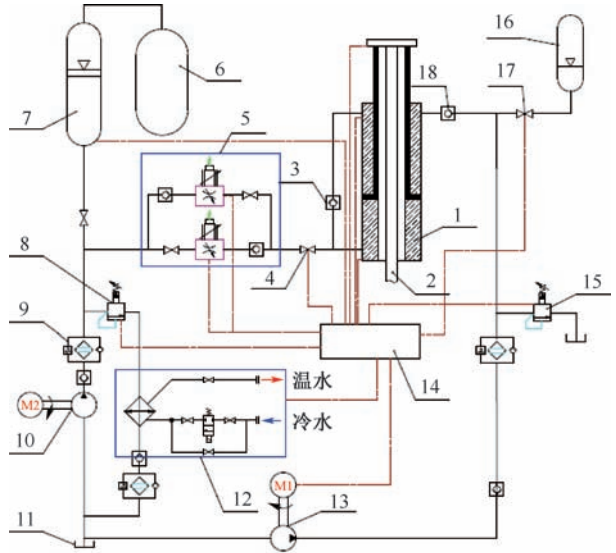
Fig. 3 Articulation joint

在液压缸活塞杆伸缩过程中,对中装置与转喷器底座的接触可能导致转喷器外壳内部密封面发生

磨损。为此,设计防磨衬套,并将其安装在液压缸外筒的底端,确保扶正器在防磨衬套内能够实现相对滑动,从而有效减少磨损,对中装置与防磨衬套的高度设计确保在整个液压缸冲程范围内(包括完全拉伸和完全收缩状态)均能满足防磨衬套的工作要求。

3 液压补偿系统

液压补偿系统由中空式液压缸及配套液压系统构成。液压缸外筒设有卡爪,用于将液压缸稳固地安装于平台的卡盘上,为通过中空式活塞杆的悬挂单根提供可靠支撑。液压系统主要由油箱、恒压变量泵、螺杆泵、过滤器、蓄能器、活塞式蓄能器、空气瓶、单向阀、速闭阀、溢流阀、比例插装节流阀组、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)等组成(图 4)。该液压系统主要功能是驱动液压缸活塞的运动,并根据隔水管系统在避台与井间移位作业时的需求,设计 3 种工作模式:差动节流补偿、被动非节流补偿与节流屏蔽模式。



1-液压缸; 2-悬挂单根; 3-单向阀; 4-速闭阀; 5-比例插装节流阀组; 6-空气瓶; 7-活塞式蓄能器; 8-溢流阀; 9-过滤器; 10-恒压变量泵; 11-油箱; 12-换热器; 13-螺杆泵; 14-PLC; 15-溢流阀; 16-蓄能器; 17-速闭阀; 18-单向阀

图 4 差动节流补偿模式液压系统

Fig. 4 Hydraulic system of choke compensation mode

3.1 差动节流补偿模式

差动节流补偿模式用于避台作业期间控制隔水管系统的极端动载。其液压系统原理如图 4 所示,在系统运行过程中,恒压变量泵和螺杆泵分别向活塞式蓄能器和蓄能器充油至设定压力,并在充油完成后关闭,分别形成高压和低压状态。通过调节比

例插装节流阀组的阀口开度,精确控制液压缸的动作。具体过程为:

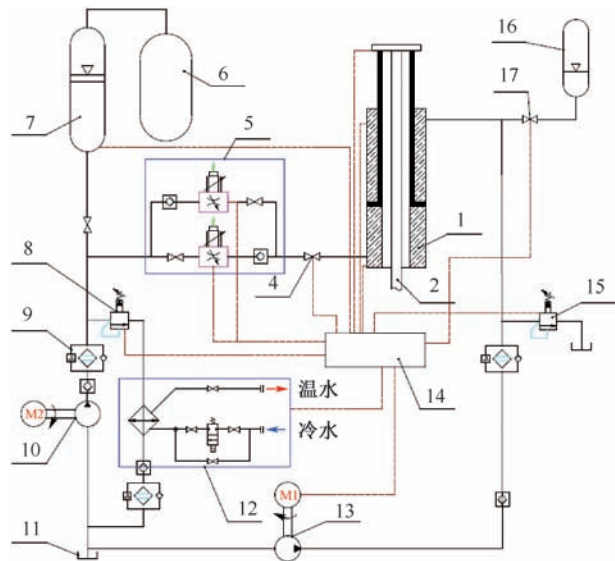
1) 活塞杆上冲程。当液压缸无杆腔的压力低于设定值时,系统通过调节比例插装节流阀组的阀口开度,形成差动回路,使活塞式蓄能器与液压缸有杆腔中的液压油流向无杆腔,推动活塞杆伸出,从而提高隔水管系统的动载。

2) 活塞杆下冲程。当液压缸无杆腔的压力高于设定值时,通过调节比例插装节流阀组的阀口开度,液压缸无杆腔中的液压油流向活塞式蓄能器,同时促进液压油温度升高并推动活塞杆缩回,以降低隔水管系统的动载。在此过程中,当蓄能器中的压力超过溢流阀设定的压力时,高温液压油将通过换热器流回油箱,从而维持系统压力与温度平衡。

为进一步增强安全性,若系统监测到液压系统压力异常,PLC 控制系统会迅速关闭速闭阀,锁住活塞,防止液压缸失控,确保整个系统在极端工况下仍能安全运行。

3.2 被动非节流补偿模式

被动非节流补偿模式用于温和海况下(如井间移位作业)的隔水管系统动载补偿,其液压系统原理如图 5 所示。该模式需在差动节流补偿模式(图 4)的基础上进行改造,取消液缸油路上的单流阀,将比例插装节流阀组的阀口开度设定为 100%,形成一个以活塞式蓄能器、蓄能器、比例插装节流阀组和液压缸为核心的回路。



注:序号含义如图 4 所示。

图 5 被动非节流补偿模式液压系统

Fig. 5 Hydraulic system for passive compensation mode

在系统初始工作时,液压泵分别向活塞式蓄能器和蓄能器充油至设定压力,随后关闭液压泵。在平台激励作用下,隔水管系统的动载发生变化,进而引起液压缸的无杆腔和有杆腔压力波动。通过蓄能器的蓄能作用,有效补偿动载变化,进而提高隔水管系统的安全性。

3.3 节流屏蔽模式

节流屏蔽模式是在差动节流补偿模式或被动非节流补偿模式的基础上,通过将液压缸的活塞推至中位,并关闭比例插装节流阀组或速闭阀,使液压缸进入锁定状态。该模式适用于非极端海况下的安全作业。在此模式下,液压补偿系统不再补偿隔水管系统的动载,但悬挂系统仍发挥作用,有效减缓隔水管顶部动态载荷。

4 测控系统

为控制隔水管多功能悬挂系统,设计并开发新的测控系统,主要包括:

1) 监测系统。实时采集并监控隔水管多功能悬挂系统及隔水管系统的关键参数,包括液压缸活塞杆的伸出量、液压缸无杆腔的压力、悬挂单根的应力以及液压油的温度等。通过这些数据,监测系统能够为系统运行提供必要的实时反馈。

2) 上位机。作为人机交互界面,负责控制系统宏观指令的制定,并包含数值仿真、控制决策和监测预警模块。上位机基于隔水管和多功能悬挂系统的动力学仿真与控制仿真系统进行数值分析,确定作业环境下的隔水管悬挂系统工作模式与系统参数。上位机向下位机下发控制指令,并根据监测系统的数据进行实时预警和调整控制决策。

3) 下位机。由 PLC、A/D 转换模块、输出输入模块等组成,是控制系统的核心。下位机负责接收上位机传递的控制指令,并精确执行,调控执行系统完成预期工作。在差动节流补偿模式下,下位机通过流程控制器实时调控执行系统,补偿隔水管系统动载。

4) 执行系统。根据下位机的指令,执行系统控制插装式节流阀组、恒压变量泵、换热器等液压组件,完成各项操作。执行系统的工作确保液压系统能够按照预定的控制策略高效运转。

整个测控系统的工作流程如下:监测系统实时跟踪隔水管和隔水管多功能悬挂系统的运行状态,并将实时数据传输至上位机和下位机。上位机根据数据进行分析与决策,下位机执行具体的控制指令,

并进行必要的预警和调整,保障隔水管多功能悬挂系统与隔水管系统的安全稳定运行。

5 海试效果评估

悬挂系统、液压补偿系统及测控系统完成集成测试,并搭载某深水钻井平台,在南海西部某 1 400 m 水深的井位开展隔水管悬挂长度为 1 100 m 的航行及动载补偿测试,隔水管多功能悬挂系统海试如图 6 所示。



图 6 隔水管多功能悬挂系统海试

Fig. 6 Sea trial of multifunctional hang-off system

在测试过程中,分别在常规硬悬挂模式(即未配置多功能悬挂系统)、节流屏蔽模式、被动非节流补偿模式和差动节流补偿模式下(其中,比例插装节流阀组的阀口开度分别设置为 60%、80% 和 100%)对隔水管进行悬挂安全性测试。在被动非节流补偿模式下进行平台在逆流与顺流条件下的航行测试,平台在 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 节的航速下均保持稳定航行。

综合分析原始试验数据,得出不同模式下隔水管顶部应力的变化情况,如图 7 所示。结果表明:采用多功能悬挂系统后,隔水管顶部应力明显减小。

在被动非节流补偿模式和差动节流补偿模式下,应力进一步减小。同时,分析不同模式下隔水管系统动载的标准差与补偿效果,分别如图 8 与表 1 所示。结果显示,安装多功能悬挂系统后,隔水管系统动载的标准差显著降低,从常规硬悬挂模式下的 33.51 kN 下降至 2.23 kN 以下,动载补偿率达到 93.34% 以上。进一步分析表明:当比例插装节流阀组的阀口打开时,隔水管系统动载的标准差降至 1.34 ~ 1.95 kN,动载补偿率提高至 94.17% 以上。表明液压补偿系统在有效减小隔水管系统动载变化幅值方面具有显著作用,且比例插装节流阀组处于打开状态时,其补偿效果更好。

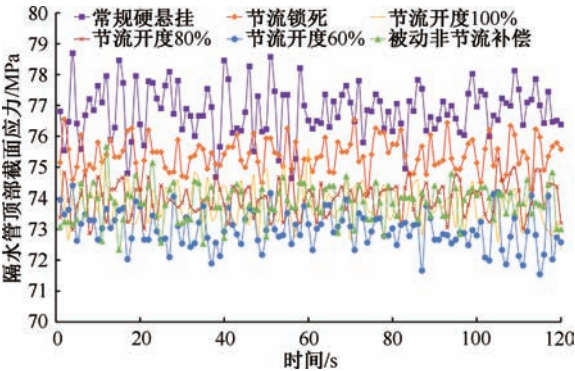


图 7 不同模式下隔水管顶部的应力

Fig. 7 Stress at the top of the riser system

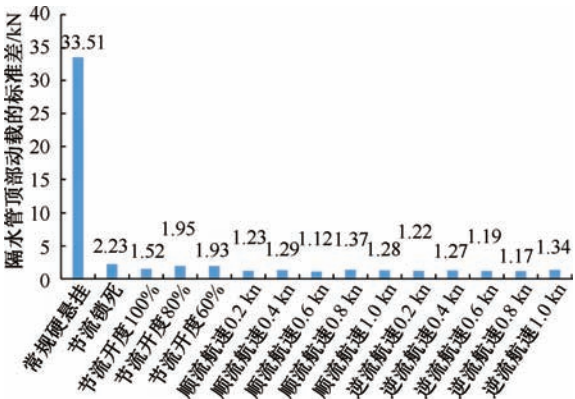


图 8 不同模式下隔水管系统动载的标准差

Fig. 8 Standard deviation of dynamic load for the riser system under different modes

表 1 与常规硬悬挂相比,不同模式的补偿效果

Table 1 Compensation effect of different modes compared to the conventional hard hang-off mode														
模式	节流屏蔽模式	差动节流补偿模式			被动非节流补偿模式									
		比例插装节流阀组的阀口开度/%			顺流航速/kn					逆流航速/kn				
		100	80	60	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
动载补偿率/%	93.34	95.46	94.17	94.25	96.33	96.14	96.67	95.91	96.17	96.37	96.21	96.45	96.51	96.01

图 9 为测试过程中不同模式下隔水管底部转角的时程,图 10 为不同模式下隔水管顶部转角。分析结果表明:在平台处于非航行状态时,隔水管底部和顶部的转角变化较小;而在平台顺流与逆流航行时,随着航速的提高,隔水管的底部和顶部转角均呈现出增大趋势。在整个测试过程中,隔水管的转角始终保持在安全极限值以内。

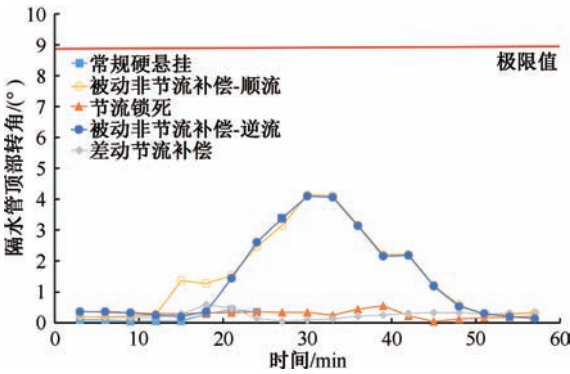


图 9 不同模式下隔水管底部转角

Fig. 9 Angle at the bottom of risers under different modes

总体而言,隔水管多功能悬挂系统在不同工作工况下能够减小隔水管系统的动载幅值,从而有效提升其稳定性和安全性。

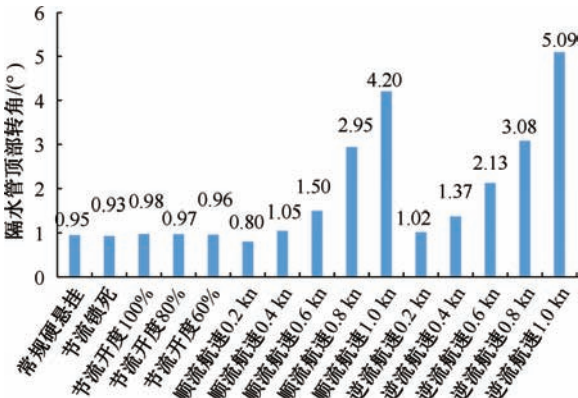


图 10 不同模式下隔水管顶部转角

Fig. 10 Angle at the top of riser in different modes

6 结 论

1) 设计了一种深水隔水管多功能悬挂系统,系统海试结果表明:采用该系统后,隔水管顶部应力及动载水平显著降低,在被动非节流补偿模式和差动节流补偿模式下,动载补偿率达到 94.17% 以上。采用研发的隔水管悬挂系统,钻井船在顺流与逆流航速均达 1.0 kn,可将常规的悬挂隔水管航行速度(不超过 0.3 kn)提升 3 倍以上。

2) 深水隔水管多功能悬挂系统具备显著的动载荷补偿功能,应对南海台风等恶劣海况条件下悬挂隔水管的安全风险,降低台风等极端恶劣海况条件下悬挂隔水管的灾变风险。

参 考 文 献

[1] 谢彬,曾恒一. 我国海洋深水油气田开发工程技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 166-176.
XIE Bin, ZENG Hengyi. Research progress on engineering technology for the development of offshore deepwater oil and gas fields in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(1): 166-176.

[2] 俞进. 海上作业安全管理数字化实施方案[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 16-22.
YU Jin. Solution of digital transformation for offshore work safety management[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 16-22.

[3] 王秋惠,云婷. 基于 CTA 的海上应急伤员处置舱作业安全设计[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 198-204.
WANG Qiuhui, YUN Ting. Safety design for maritime emergency casualty disposal cabin based on CTA[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 198-204.

[4] 周建良,许亮斌. 深水钻井隔水管关键技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 135-143.
ZHOU Jianliang, XU Liangbin. Research progress on key technologies of risers in deepwater drilling[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4): 135-143.

[5] 盛磊祥,许亮斌,刘健,等. 新型深水钻井隔水管悬挂系统设计[J]. 海洋工程, 2019, 37(5): 99-106.

SHENG Leixiang, XU Liangbin, LIU Jian, et al. Design of riser suspension system for new deepwater drilling[J]. Ocean Engineering, 2019, 37(5): 99–106.

[6] 鞠少栋, 畅元江, 陈国明, 等. 深水钻井隔水管悬挂窗口确定方法[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 133–136.

JU Shadong, CHANG Yuanjiang, CHEN Guoming, et al. Method for determining the suspension window of the riser in deepwater drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 133–136.

[7] 盛磊祥, 王荣耀, 许亮斌, 等. 台风应急期间深水钻井隔水管悬挂撤离安全分析[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 25–29.

SHENG Leixiang, WANG Rongyao, XU Liangbin, et al. Safety analysis of suspension evacuation of riser in deepwater drilling during typhoon emergency[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 25–29.

[8] 许亮斌, 周建良, 王荣耀, 等. 南海深水钻井平台悬挂隔水管撤离防台分析[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 101–107.

XU Liangbin, ZHOU Jianliang, WANG Rongyao, et al. Analysis of evacuation of suspended Riser from deepwaterdrilling platform in the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 101–107.

[9] 王金龙, 陈景皓, 盛磊祥, 等. 深水钻井隔水管极端环境下悬挂响应特征验证分析[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(6): 106–110.

WANG Jinlong, CHEN Jinghao, SHENG Leixiang, et al. Verification and analysis of hang-off response characteristics for deepwater drilling riser in extreme environment[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(6): 106–110.

[10] 朱高庚, 陈国明, 刘康. 深水钻井隔水管下放作业可靠性智能评估方法[J]. 船舶力学, 2025, 29(1): 125–135.

ZHU Gaogeng, CHEN Guoming, LIU Kang. Intelligent assessment method of reliability for deepwater riser deployment[J]. Journal of Ship Mechanics. 2025, 29(1): 125–135.

[11] ZHANG Nan, CHANG Yuanjiang, XU Lei, et al. An improved coupled model for axial dynamic analysis of deepwater drilling risers under a soft hang-off mode[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 19(6): 740–755.

[12] ZHANG Shaozeng, JIN Xueyi, LIU Hongbo, et al. Applicability evaluation of deepwater drilling risers in hang-off mode during well shif[C]. ISOPE 2025, 2025: 1 633–1 638.

作者简介： 盛磊祥 （1981—）,男,山东招远人,硕士,高级工程师,主要从事深水油气田开发与钻完井技术方面的研究。E-mail:shenglx@cnooc.com.cn。

