◀海洋石油装备▶

多平台协同防喷器系统虚实融合平台开发*

方 立[1] 程雨旺[1] 王智徽[2] 王向宇[2] 李 雪[2] 王佳欣[2] 王辰宇[2]
（1. 中国海洋工程装备技术发展有限公司 2. 烟台哈尔滨工程大学研究院）

方立，程雨旺，王智徽，等. 多平台协同防喷器系统虚实融合平台开发［J］. 石油机械，2026，54（10）：63-70.

Fang Li，Cheng Yuwang，Wang Zhihui，et al. Development of a multi-platform virtual-real fusion simulation framework for BOP system［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：63-70.

摘要：海洋油气开发中，水下防喷器系统作为井控安全系统的核心装备，其性能可靠性直接关系到钻井作业的安全性和经济性。为克服传统研究在多系统联合仿真方面的不足，构建了基于AMESim、Simulink和LabVIEW的多平台协同仿真系统，实现了液压系统高精度建模、控制算法开发和实时可视化监控的完整仿真验证体系。通过AMESim建立防喷器液压系统的高保真液压模型，精确模拟防喷器液压系统在复杂工况下的动态响应特性；通过Simulink环境开发控制算法，实现故障自动报警并自主调节液压系统压力、位移等关键参数；利用硬件在环测试装置加载联合仿真模型，实现半物理多平台联合仿真；基于LabVIEW平台开发集参数配置、实时监测和可视化于一体的人机交互界面，通过数据流编程技术确保系统实时响应。对水下防喷器系统蓄能器充压、防喷器动作及故障报警等典型工况进行了系统性仿真分析。仿真结果表明，该系统在多种典型工况下，能够精确模拟防喷器液压动态响应过程，直观验证操作可靠性与控制适应性。研究结果可为油气装备的设计优化、性能评估与安全验证提供有效的技术解决方案，对推动海洋油气开发装备的智能化发展具有重要的理论意义和工程应用价值。

关键词：海洋油气；防喷器；AMESim；Simulink；LabVIEW；动态响应
中图分类号：TE931 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202507079

Development of a Multi-Platform Virtual-Real Fusion Simulation Framework for BOP System

Fang Li[1] Cheng Yuwang[1] Wang Zhihui[2] Wang Xiangyu[2] Li Xue[2] Wang Jiaxin[2] Wang Chenyu[2]
（1. *China Offshore Engineering & Technology Co.*, *Ltd.*; 2. *Yantai Research Institute*, *Harbin Engineering University*）

Abstract: Subsea blowout preventer (BOP) system is a core component of the well control system in offshore oil and gas development. Its performance reliability directly affects the safety and economy of drilling operations. To address the insufficiency of traditional research in multi-system simulation, this study develops a multi-platform simulation framework based on AMESim, Simulink and LabVIEW, enabling a complete simulation and verification workflow involving high-precision modeling of hydraulic systems, formulation of governing algorithms, and real-time visual monitoring. Firstly, a high-fidelity model of the BOP hydraulic system was established through AMESim to accurately simulate the dynamic responses of the BOP hydraulic system under complex working conditions. Secondly, the governing algorithms were formulated under the Simulink environment to enable automatic fault alarm and independent adjustment of key parameters (e. g. pressure and displacement) of the hydraulic system. The joint simulation model was loaded on the hardware-in-the-loop (HIL) test device to realize a semi-physical multi-platform simulation. Subsequently, a human-machine interface integrating parameter configura-

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

tion, real-time monitoring and visualization was developed via the LabVIEW platform, and dataflow programming was adopted to ensure real-time response of the system. Finally, systematic simulation was conducted on typical working conditions (e. g. accumulator charging, BOP motion, and fault alarm) of the subsea BOP system. The results show that the multi-platform simulation framework accurately simulates the dynamic response process of the BOP hydraulic system under various typical working conditions and visually verifies the operation reliability and control adaptability. The study provides an effective solution for design optimization, performance evaluation and safety verification of offshore oil and gas equipment, and is of theoretical and engineering significance for advancing these equipment toward intelligence.

Keywords: offshore oil and gas; BOP; AMESim; Simulink; LabVIEW; dynamic response

0　引　言

全球海洋油气资源开发不断向深水及超深水领域拓展[1]。水下防喷器（blowout preventer, BOP）作为井控安全系统的核心装备，其性能可靠性直接关系到钻井作业的安全性和经济性[2-3]。在采油作业过程中，BOP 系统需要具备快速响应、高可靠性和抗极端工况的能力，任何功能失效都可能引发灾难性事故[4-5]。因此，建立完善的 BOP 性能验证方法对保障海洋油气安全开发具有重要意义[6]。

防喷器系统作为水下油气钻采工程的核心井控安全装置，其性能与动态响应特性直接决定井筒压力控制能力，是保障作业安全性和防止井喷事故的关键[7-8]。作为井控体系的最后一道物理屏障，该系统的可靠性直接决定了极端工况下井喷事故的防控能力，这也是工程人员和学者关注的焦点之一。马卫国等[9]基于 AMESim 软件建立防喷器的液压模型，探究了防喷器操作压力和井筒压力对于闸板动作响应的影响规律。李滨等[10]通过显示动力学模块开展闸板防喷器剪切数值分析，探究了极端工况下闸板防喷器剪切失效场景。蔡宝平等[11]开发了基于 LabVIEW 的深水防喷器监控系统，模拟了井控设备的人机交互，实现了防喷器回路压力、流量、环境温度、闸板位移等信息的采集。叶玉杰[12]开发了以主控和分控 PLC 作为下位机，共同协作采集数据和执行控制的 LabVIEW 液压站监控系统。目前，BOP 系统的性能测试主要依赖物理试验和单一领域的数值仿真，传统的液压系统仿真多采用 AMESim 等专用工具，而控制逻辑分析则依赖于 Simulink 等平台，这种分离的仿真模式难以准确反映 BOP 系统在实际作业中液-电-控多系统耦合的特性。

单纯的数字仿真为防喷器系统的设计与分析提供了高效、低成本的初始研究平台，但是难以真实反映在实际作业中控制器硬件性能、信号传输延迟等因素对系统造成的影响。相较于单纯的数字仿真分析，硬件在环（hardware-in-the-loop, HIL）测试技术能够在安全、可控的实验室环境中实现对真实控制器和系统动态的高精度实时验证，显著降低现场测试成本与风险，已逐渐成为复杂机电系统性能验证的重要方法[13]。王文霞等[14]基于 dSPACE 和 MATLAB/Simulink 进行了发动机控制器 ECU 的硬件在环仿真试验，并验证了测试试验的有效性。褚德英等[15]开发了动力定位系统 HIL 试验平台，测试结果表明，该平台具有较好的实时性和扩展性，为海洋工程控制系统 HIL 测试的推广奠定了基础。尽管上述研究推动了 HIL 技术的应用，但在防喷器虚拟测试领域仍缺少多平台协同的 HIL 测试研究。

笔者通过多平台协同仿真与 HIL 测试相结合的方法，构建了一套多平台协同的防喷器虚实融合测试平台。首先根据 BOP 系统液压原理和工况参数，在 AMESim 中建立液压系统模型；进而通过联合仿真接口将其集成至 Simulink 环境中，实现液压、电气和控制系统的联合仿真；最后利用 LabVIEW 开发具有实时控制和动态展示功能的 HIL 测试平台。此平台不仅能够模拟 BOP 系统在多种极端工况下的动态响应过程，还可通过可视化界面直观呈现系统测试过程，从而为 BOP 系统的优化设计和性能评估提供更加全面的参考依据。

1　总体方案设计

防喷器系统作为石油钻井工程的核心安全装备，主要由闸板防喷器组和环形防喷器组等组成[16]。其中：闸板防喷器采用多组液压闸板完成钻具的抱紧密封；环形防喷器则依靠弹性胶芯的径向压缩实现管柱的动态密封。防喷器系统不仅

为井涌、井喷等紧急工况提供多重防护，还能为后续压井作业创造必要条件，是保障钻井作业安全、环境保护和资源有效开发的关键技术装备。

构建的基于多平台协同的防喷器系统虚实融合平台，集成 AMESim、Simulink 和 LabVIEW 3 大工程软件的优势，实现了防喷器的控制、测试和监控仿真分析，如图 1 所示。其中：AMESim 负责建立液压系统模型，精确模拟泵组、蓄能器组和各类防喷器的动态特性；Simulink 用于开发控制算法，调节压力、位移等关键参数；将仿真模型加载到 HIL 测试装置中，实现半物理多平台联合仿真；LabVIEW 用于构建直观的可视化人机交互界面，通过 UDP 协议与 Simulink 进行通信，实时显示系统运行状态[17]。该平台通过连接虚拟仿真环境与实际控制系统，实现多平台联合仿真，为防喷器提供了一个功能完备、可靠的性能验证平台。



图 1　防喷器控制系统测试系统框图

Fig. 1　Block diagram of the simulation framework for BOP control system

2　防喷器多物理域仿真模型搭建

防喷器系统的联合仿真涉及机械、液压和控制等多个领域，传统单一仿真工具存在明显局限[18]。笔者结合 AMESim 的液压仿真优势和 Simulink 的控制程序开发能力，建立了一个防喷器多平台协同仿真模型。

2.1　BOP 液压系统仿真模型搭建

2.1.1　BOP 液压系统原理图

防喷器液压系统原理如图 2 所示。该系统由高压系统与低压系统组成，二者工作原理相似，均通过液压泵向系统供油。蓄能器组用于储存液压能，当系统需补充流量时，蓄能器释放能量，与液压泵共同向系统供油。高压和低压回路的减压阀用于调节供给系统的压力，以满足后方执行机构的要求。调压后的液压油经管路输送至液压控制阀和相关执行机构，执行机构通过三位四通换向阀进行控制。各执行机构均配备位移传感器与压力反馈装置，与控制系统构成闭环调节机制，从而确保防喷器组能够根据井况实现快速、准确的响应。

2.1.2　仿真模型搭建

根据防喷器系统的液压原理和实际工作流程，基于 AMESim 构建了防喷器液压仿真模型[19]，如图 3 所示。仿真模型主要包括液压动力系统、蓄能器组、液压控制系统及执行机构。在液压仿真模型的基础上，通过创建联合仿真接口实现 Simulink 对 AMESim 液压模型的控制和监测，在完成 AMESim 外部接口的配置后，需建立输入/输出信号的逻辑连接。根据仿真场景的工况需求，将控制指令信号与执行元件响应信号进行精确匹配，实现将控制系统的输出变量映射至液压执行机构的输入端口，将传感器反馈信号关联至监测模块的输入通道。

基于所搭建的防喷器液压仿真模型，可模拟防喷器在多种典型工况下的动态响应情况，从而为系统性能评估、控制策略优化及可靠性验证提

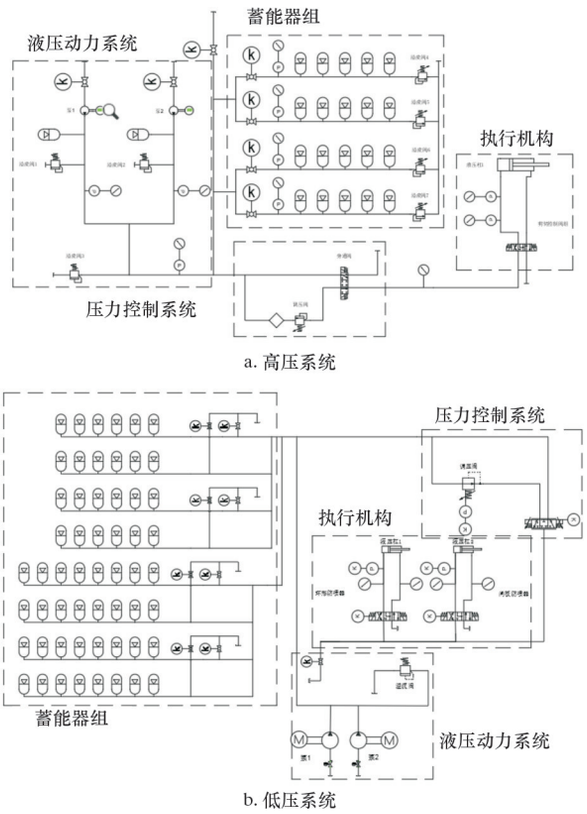


图 2　防喷器液压系统原理图

Fig. 2　Schematic diagram of the BOP hydraulic system

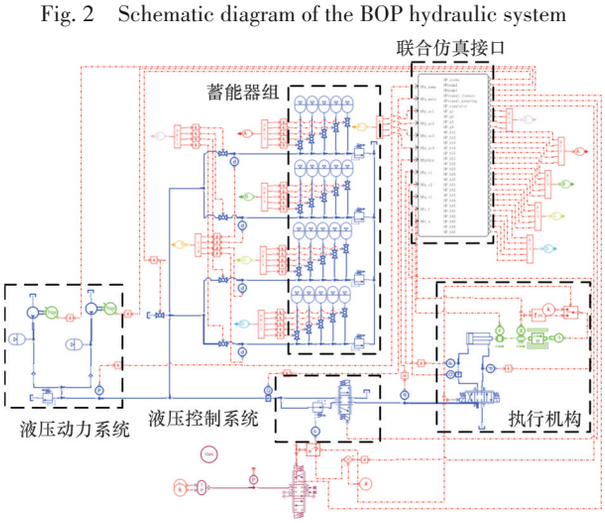


图 3　防喷器高压系统液压仿真模型

Fig. 3　Hydraulic simulation model of the BOP high-pressure system

供有效的数值分析手段。

2.2　基于 Simulink 的控制平台搭建

完成 AMESim 的接口创建及完整仿真模型的创建后，在 Simulink 环境中新建仿真文件，通过 Simulink Library Browser 定位并调用 Simcenter Amesim Interfaces 模块库中的 AME2SLCoSim 协同仿真接口模块，导入预先由 AMESim 生成的动态链接库文件。完成模块配置后，连接示波器监测模块以实时观测仿真输出数据。运行仿真后，示波器成功显示各物理量的动态响应曲线，这一结果表明 AMESim 与 Simulink 的联合仿真环境已正确建立。图 4 为 Simulink 中的高压系统的仿真控制模型。

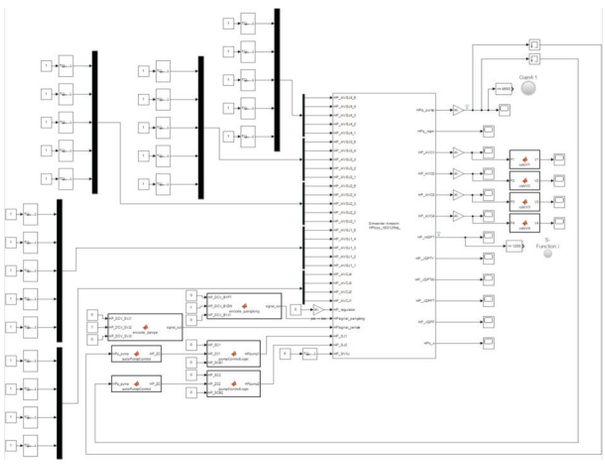


图 4　高压系统仿真控制模型

Fig. 4　High-pressure system simulation control model

所搭建的仿真控制系统通过设置输入采集模块对各类输入信号进行采集与结构化整理，并利用 MATLAB Function 和 S-Function 搭建控制系统内部逻辑，实现数据的整理、格式化与帧级打包。为了保证系统在不同工作状态下灵活运行，设定了参数配置与控制模块，为整个系统提供运行策略与逻辑控制。同时，通过逻辑判断与信号触发机制，自动控制数据传输，最终通过输出打包与发送模块将数据整合输出，实现对系统运行状态的可编程管理。针对系统信号可视化需求，利用 Scope 与 Display 模块对数据输出变化情况进行实时监测。

通过构建联合仿真环境，实现了在 Simulink 中对 AMESim 平台下的防喷器液压模型进行运行参数编程控制、关键参数变化过程的实时监测与可视化展示、液压元件状态的自动调控，以及防喷器工作模式的动态切换等功能，从而提升系统分析的集成性与灵活性，增强仿真过程的自动化水平与工程应用价值。

3　人机交互系统开发

3.1　人机交互通信架构设计

为实现 Simulink 与 LabVIEW 平台间的实时数据交互，采用 UDP/IP 通信协议构建分布式通信架构，结合定制化开发的通信接口程序，实现了 Simulink 仿真环境与 LabVIEW 测控平台之间的低延迟数据通道。

在程序初始化后，数据采集流程开始运行，Simulink 通过 UDP 协议将模拟量信号传输至数据采集卡进行标定处理。标定完成后，程序根据设定的数据打包格式对接收数据进行拆包。数据类型包括模拟量、数字量等。随后，程序在循环结构中对不同类型的数据进行判断和处理，实现对采集信息的分类识别与响应。该通信方案不仅实现了模型数据的双向传输，还保障了仿真数据的时间同步性，从而为构建完整的 HIL 测试系统提供了可靠的通信基础架构。

3.2　人机交互界面开发

联合仿真过程中，同一仿真模型通常具有多种仿真需求。为此，设计了双界面协同方案：操作界面集成参数设置、模式切换和指令控制功能，通过逻辑分组和智能默认值简化操作流程；动态展示界面则通过二维模型实时呈现设备状态和流体运动情况，关键参数以悬浮标签形式直观显示。两界面数据实时同步，并支持点击设备模型直接跳转至对应控制模块，从而形成操作–反馈闭环交互机制，显著提升仿真调试与分析效率。

3.2.1　操作界面

操作界面采用模块化分区设计，可实现在高压与低压系统之间的灵活切换，如图 5 所示。界面按照功能特性划分为 5 个核心模块：动力系统监控区，集中显示动力单元运行参数；蓄能器系统管理区，实时监测储能状态；调压系统控制区，提供压力调节操作界面；执行器操作区，实现对执行机构的精准控制；故障报警区，采用分级警示机制显示系统异常。用户通过左上角选项卡可切换高低压操作页面，使用互锁逻辑实现防喷器组开关控制指令的唯一性，利用输入控件实现开关量与压力设定值的控制，并通过波形图表等显示控件完成对模拟量数据的实时监测与趋势显示，实现与 Simulink 的双向数据交互。经 Simulink 处理后的数据可进一步传输至 AMESim 仿真系统，最终形成完整的闭环通信链路。

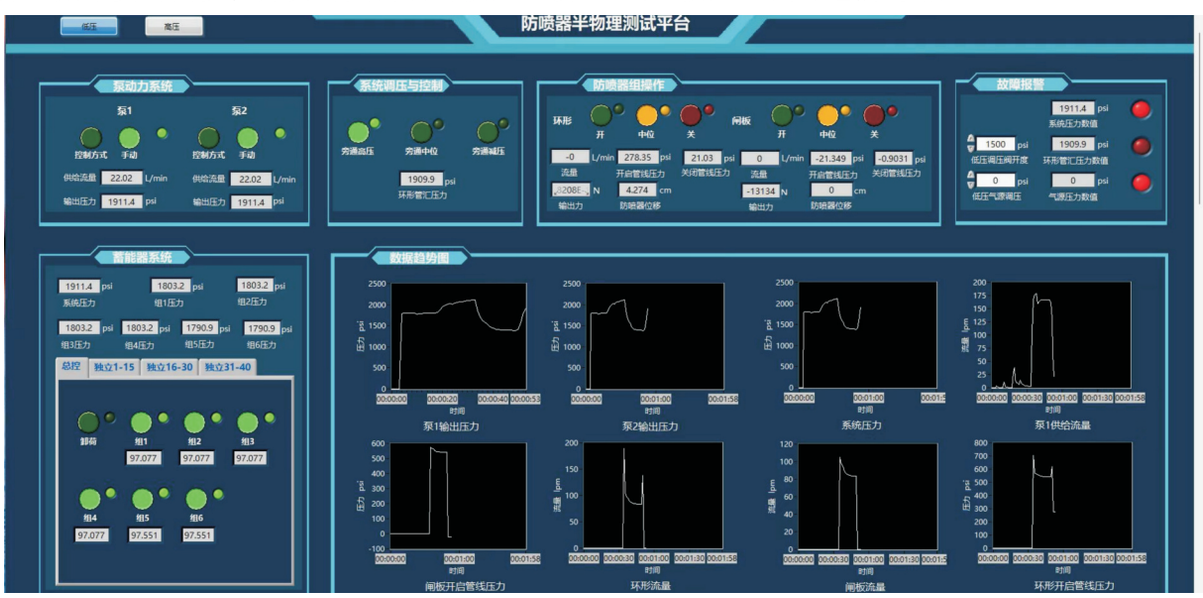


图 5　操作界面

Fig. 5　Operation interface

3.2.2　展示界面

为提高仿真测试过程的直观性，在操作界面的基础上开发可视化展示界面，用于实时反映防喷器机构运动状态、管道流体流动动态效果及系统元件工作参数动态，如图 6 所示。该展示界面接收 Simulink 的实时数据，经过内部逻辑处理后，在前面板上展示实时动态效果。为动态模拟管道内液体流动与防喷器运动状态，采用条件结构来触发相应的动画逻辑，并通过操控对应自定义控件的属性节点来实现。为实现代码的简洁与高效，对于需要被多个条件分支重复调用的触发逻辑，将其赋值给一个局部变量，再通过读取该局部变量状态来统一驱动相关属性节点的变化，从而同步更新界面动画。

本研究设计的仿真系统人机交互界面是人机协同的核心枢纽，采用模块化与分层设计，实现了参数的系统化管理和多维数据的实时监控，确保了系统的扩展性，显著增强了仿真过程的可观测性和仿真效率，可为复杂工程仿真提供解决方案。

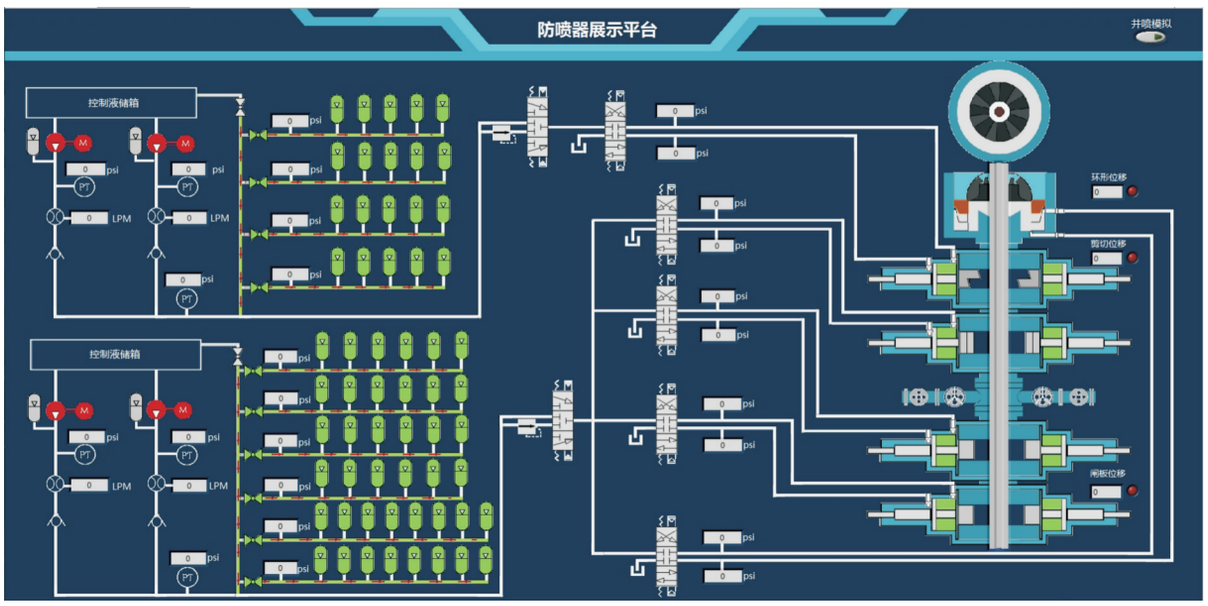


图 6　动态展示界面

Fig. 6　Dynamic display interface

4　BOP 系统仿真分析

本研究构建了一套防喷器液压系统多工况联合仿真平台，利用构建的平台对 BOP 系统的 3 个关键工况进行仿真分析，以验证平台的有效性和准确性。

4.1　蓄能器充压过程仿真分析

蓄能器充压过程：三位四通转阀处于中位，旁通阀关闭，打开蓄能器球阀和蓄能器隔离球阀，开启系统卸荷阀，使蓄能器系统卸压至 0；然后关闭系统卸荷阀，启动泵，使蓄能器组升压至额定工作压力。高压系统升至 38.5 MPa，低压系统升至 24.5 MPa。高低压系统泵充能时蓄能器的压力仿真结果如图 7 所示。

高压系统蓄能器预充压力为 26.6 MPa，充压时间约为 860 s；低压系统蓄能器预充压力为 13.0 MPa，充压时间约为 700 s，与单独使用 AMESim 软件的仿真结果完全一致。

4.2　防喷器操作过程仿真分析

防喷器高压系统有剪切防喷器，低压系统有半闸板防喷器和环形防喷器。高压系统剪切防喷器的工作流程：调压阀出口压力达到设定条件下，将旁通阀调至旁通，操作三位四通阀至左位，并给定输入负载，仿真从操作阀手柄到防喷器关闭的时间，观测剪切防喷器最大输出力、工作压力和蓄能器体积变化等性能数据。剪切防喷器液压缸剪切曲线仿真结果如图 8 所示。

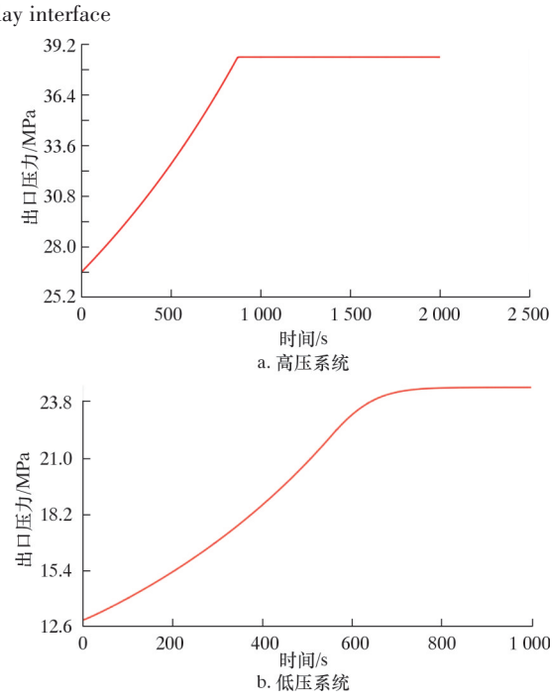


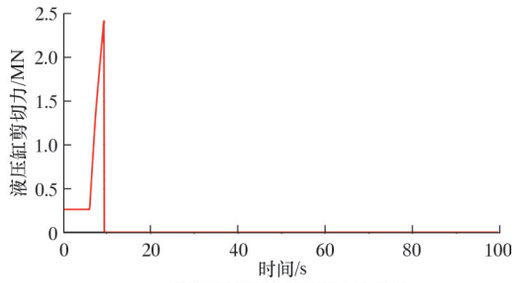
图 7　防喷器液压系统充压曲线图

Fig. 7　Charging curve of the BOP hydraulic system

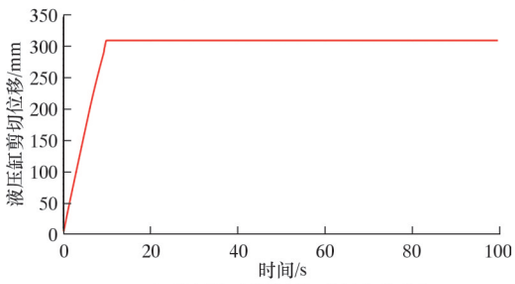
由图 8 可知，防喷器工作分 4 个阶段。起初刀体未接触钻杆，压力较小，仅克服运动阻力；随后刀体接触并挤扁钻杆，压力迅速上升；待钻杆完全挤扁后，因失去变形空间，压力急剧升高直至剪断钻杆；最终钻杆崩开，刀体自由运动，压力随之迅速下降。经过与单独使用 AMESim 软件的仿真进行对比，仿真结果完全一致。

4.3　系统故障报警仿真分析

高压系统和低压系统中管汇压力过低会触发系统报警。调节剪切管汇调压阀，使剪切管汇压



a. 剪切防喷器液压缸剪切力曲线

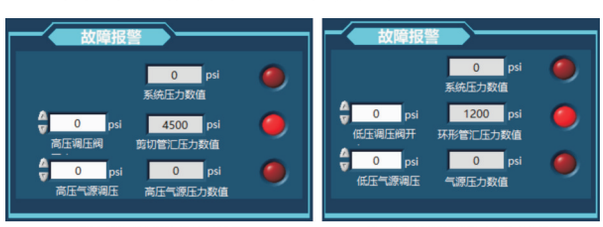


b. 剪切防喷器液压缸剪切位移曲线

图 8　剪切曲线图

Fig. 8　Shear curves

力缓慢降至 31.5 MPa（4 500 psi），此时系统触发报警；调节环形管汇调压阀，使环形管汇压力缓慢降至 8.4 MPa（1 200 psi），系统触发报警，与 BOP 系统故障报警结果一致，如图 9 所示。



a. 剪切管汇低压力报警　　b. 环形管汇低压力报警

图 9　故障报警局部图

Fig. 9　Partial diagram of fault alarm

5　结束语

笔者构建了一个基于多平台协同的防喷器虚实融合仿真平台，利用 AMESim 建立高保真液压模型；通过 Simulink 搭建控制算法；借助 HIL 测试设备实现半物理仿真，并基于 LabVIEW 搭建人机交互界面。该平台显著提升了系统仿真的实时性及复杂工况下系统的可视化和交互能力。关键工况仿真分析结果表明，构建的仿真平台能够准确地模拟防喷器在不同工况下的动态响应过程，具有良好的工程适用性。该研究为防喷器系统的智能化、数字化开发提供了一种可行路径，具备良好的推广应用前景，可为深水油气开发提供更加安全、高效的井控装备保障。

参　考　文　献

[1] 李清平，朱海山，李新仲. 深水水下生产技术发展现状与展望[J]. 中国工程科学，2016，18（2）：76-84.
Li Qingping，Zhu Haishan，Li Xinzhong. The current state and future of deep water subsea production technology [J]. Engineering Science，2016，18（2）：76-84.

[2] 赵涛，黄元元，贾向锋，等. 我国海洋油气钻井装备技术现状及展望[J]. 石油机械，2022，50（4）：56-62.
Zhao Tao，Huang Yuanyuan，Jia Xiangfeng，et al. Offshore oil/gas drilling equipment in China：review and prospect [J]. China Petroleum Machinery，2022，50（4）：56-62.

[3] Cai Baoping，Liu Yonghong，Liu Zengkai，et al. Performance evaluation of subsea blowout preventer systems with common-cause failures [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2012，90－91：18-25.

[4] 王宇，郝希宁，李朝玮，等. 墨西哥湾井喷漏油事件的水下控油措施[J]. 海洋工程装备与技术，2020，7（6）：388-394.
Wang Yu，Hao Xining，Li Chaowei，et al. Subsea stemming the oil spill in GOM blowout incident [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology，2020，7（6）：388-394.

[5] Holand P. Reliability of deepwater subsea blowout preventers [J]. SPE Drilling & Completion，2001，16（1）：12-18.

[6] 党志刚，金业权，金经洋，等. 深水钻井防喷器系统失效定量风险分析[J]. 科学技术与工程，2020，20（31）：12789-12794.
Dang Zhigang，Jin Yequan，Jin Jingyang，et al. Quantitative risk analysis of blowout preventer system failure in deepwater drilling [J]. Science Technology and Engineering，2020，20（31）：12789-12794.

[7] Mutlu M，Wassar T，Franchek M A，et al. Real-time condition and performance monitoring of a subsea blowout preventer pipe ram [J]. SPE Drilling & Completion，2018，33（1）：50-62.

[8] Shafiee M，Elusakin T，Enjema E. Subsea blowout preventer （BOP）：design，reliability，testing，deployment，and operation and maintenance challenges [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2020，66：104170.

[9] 马卫国，梅雪松，王炜，等. 基于 AMESim 的带压作业防喷器关闭性能仿真[J]. 中国安全生产科学技术，2018，14（10）：88-94.
Ma Weiguo，Mei Xuesong，Wang Wei，et al. Simula-

tion on closing performance of blowout preventer in snubbing service based on AMESim[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(10): 88-94.

[10] 李滨，武胜男，张来斌. 极端工况下闸板防喷器剪切失效场景探究[J]. 科学技术与工程，2025，25(8)：3201-3208.
Li Bin, Wu Shengnan, Zhang Laibin. Shearing failure scenarios of ram blowout preventer under extreme working conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3201-3208.

[11] 蔡宝平，刘永红，郭晓晓，等. 基于LabVIEW的深水防喷器实验教学平台监控系统开发[J]. 实验技术与管理，2017，34(3)：143-146.
Cai Baoping, Liu Yonghong, Guo Xiaoxiao, et al. Development of monitoring system of subsea BOP experimental teaching platform based on LabVIEW [J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(3): 143-146.

[12] 叶玉杰. 基于labVIEW的液压站监控系统设计[J]. 自动化应用，2024，65(5)：191-193，196.
Ye Yujie. Design of monitoring system of hydraulic station based on labVIEW[J]. Automation Application, 2024, 65(5): 191-193, 196.

[13] 杨勇，储云泽，奚啸天. 硬件在环仿真测试技术及其在船舶行业中的应用现状[J]. 造船技术，2018，(4)：62-65.
Yang Yong, Chu Yunze, Xi Xiaotian. Hardware in the loop simulation and test technology and its application in shipbuilding industry[J]. Marine Technology, 2018, (4): 62-65.

[14] 王文霞，王德军，毕国栋，等. 发动机控制器硬件在环仿真测试研究[J]. 汽车电器，2024(6)：69-71.
Wang Wenxia, Wang Dejun, Bi Guodong, et al. Research on HIL of engine control unit[J]. Auto Electric Parts, 2024(6): 69-71.

[15] 褚德英，秦一飞，张葆华. 动力定位控制系统HIL仿真试验平台设计与实现[J]. 船舶工程，2016，38(增刊1)：77-80.
Chu Deying, Qin Yifei, Zhang Baohua. Design and implementation of HIL test platform of DP control system [J]. Ship Engineering, 2016, 38(S1): 77-80.

[16] Zhou Wei. Simulation of hydraulic system faults for marine machinery based on AMESim[J]. Journal of Coastal Research, 2019, (94): 357-361.

[17] Wang Chang, Huang Jian. Simulation and evaluation models of aircraft power supply system based on simulink /LabVIEW[C]//2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, Harbin, 2014: 81-86.

[18] Lu Wencheng, Niu Gengsen, Chen Long, et al. Study on the electro-hydraulic power steering system based on AMESim and simulink[C]//2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes, 2011: 610-613.

[19] 康帅帅，贺元成，孟志明. LMS. AMESim仿真软件在液压系统中的应用[J]. 机械工程师，2014(3)：70-72.
Kang Shuaishuai, He Yuancheng, Meng Zhiming. Application of LMS. AMESim simulation software in the hydraulic system [J]. Mechanical Engineer, 2014(3): 70-72.

第一作者简介：方　立，高级工程师，生于1977年，2007年毕业于上海交通大学机械电子专业，获博士学位，现从事水下生产系统测试技术和测试标准制定、便携式测试设备研制等领域的研究工作。地址：(200011)上海市黄浦区。email：fangli@coffshore.cn。

通信作者：王向宇，副教授。email：wangxy325@hrbeu.edu.cn。

修改回稿日期：2026-04-20

(本文编辑　刘　锋)