

钻井船仪表控制系统研制及硬件在环仿真测试

杨宝山

(胜利油田海洋采油厂, 山东 东营 257000)

摘要: 为有效提高钻井船生产过程火气安全切断的可靠性及船员的安全性, 针对钻井船仪控系统工艺过程控制和安全切断的控制策略复杂度高, 难以通过普通仪表测试, 研制了具有网络冗余的分布式控制系统和采用具有安全等级的安全控制器搭建的钻井船安全仪表系统, 并搭建了半物理仿真验证平台验证其控制逻辑的准确性。验证结果表明: 该钻井船仪表控制系统样机的过程控制和安全系统的控制策略、关断策略安全有效, 无线通讯和管理软件及报表分析、趋势预测等功能与实船需求相匹配; 借助该仿真平台不仅可以优化控制效果还提高了测试效率。

关键词: 钻井船; 仪表控制系统; 仿真测试

中图分类号: TP273; U674.38⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2020)06-0012-06

Development of Drilling Ship Instrument Control System and Hardware-in-the-Loop Simulation Test

Yang Baoshan

(Shengli Oil Field Offshore Oil Company, Shandong Dongying 257000)

Abstract: In order to effectively improve the reliability of fire and gas safety shutdown and the crew safety in the drilling ship, aiming at the high complexity of process control and safety cut-off control strategy of drilling ship instrument and control system, which is difficult to pass the ordinary instrument test, the distributed control system with network redundancy and the safety instrument system of drilling ship built with safety level safety controller were developed. A semi physical simulation platform was built to verify the accuracy of the control logic. The verification results show that: the process control and safety system control strategy and shutdown strategy of the drilling ship instrument control system prototype are safe and effective, the functions of wireless communication and management software, report analysis, trend prediction and other functions match the requirements of the real ship. The simulation platform can not only optimize the control effect, but also improve the test efficiency.

Key words: drilling ship; instrument control system; simulation test

0 引言

随着日益频繁的深海探索和深海石油资源开采活动, 钻井船的建造日益受到重视。而海上人员安全和设备安全等级的提升, 对全船监测控制技术提出了多参数、高采集频率、高精度、安全的仪表控制系统等要求。随着钻井船自动化水平的提升, 传统总线式集中监控系统已无法满足现有钻井船航行系统、机舱监控、生产作业过程控制, 以及火气安

全应急关断等系统分布式数据采集控制、多部位综合显控和高风险控制安全等级的需求。本研究针对钻井船进行仪表控制系统设计, 采用网络冗余的分布式控制系统和具有安全等级的安全控制器搭建安全仪表系统, 以满足钻井生产过程监控需求和石化生产过程火气安全切断要求, 确保船员和生产安全。钻井船仪控系统涉及的工艺过程和安全切断等控制策略复杂, 难以通过普通测试仪表直接测量。为验证其控制逻辑的准确性, 本研究搭建了半物理

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-09-09

作者简介: 杨宝山(1972—), 高级工程师, 主要研究方向为油田设备管理, ybsh7103@163.com。

仿真验证平台,通过硬线 IO 测试其硬件通道的采样准确率,并通过以太网、串口等通讯模拟各种生产过程中的故障,以验证其安全系统的关断逻辑是否正确。

1 系统要求

本研究的目标船旨在打破国内深海钻井船装备的空白,针对南海深海海域和墨西哥湾海域设计建造。该船为 DP3 电力推进船舶,共有 6 台 8 450 kW 的发电机组,3 台吊舱 5 500 kW 主推进器,3 台 3 200 kW 伸缩推进器,1 台 2 500 kW 的艏侧推。全船长 228.9 m,可作业水深为 3 000 m 以上。根据船级社要求,DP3 船舶对控制系统的要求:(1) 单点故障情况下不影响动力定位系统的正常工作。(2) 设有一套自动备用系统,该备用系统所在控制站与主系统所在的备用站之间应为 A-60 级;备用控制系统与主控制系统之间使用冗余的以太网进行高速数据传输,任何单个故障不会造成主控制系统和备用控制系统同时失效^[1]。

同时,针对钻井船的钻井作业需求进行分析,提出过程控制系统开发要求,包括:船检要求、行业法规(API 美国石油协会标准、NFPA 美国消防协会标准及 IEC61511、ABS、ABS MODU 等)以及开发技术要求,满足钻井船的钻

井工艺流程;分析生产过程中可能产生的风险并满足火气探测和应急关断系统的安全要求。最终形成符合实船的仪表控制系统功能样机一套和相应的仿真测试系统。

本研究针对目标船型,参考相似钻井船、自升式钻井平台等海工装备的自动化系统功能需求,以及钻井工艺要求的调研情况,结合船检规范的需求分析,开展总体设计及研制。仪表控制系统框架设计满足 DP3 要求;自动化系统测点容量超过 1 万 5 千点,基本覆盖现行钻井船的电气设备监控系统和测点容量要求。

钻井船仪表控制系统由过程控制系统(DCS)和安全保护系统(ESD\FGS)组成。过程控制系统和安全保护系统均采用美国知名品牌 ROCKWELL 的安全过程控制设备 AB ControlLogix L75 的冗余系统,选用 Rockwell Flex I/O 作为远程 I/O 站点。仿真测试系统选用上海船用柴油机研究所自研开发的上位机组态软件和 HTS4000 系列通用 PLC 硬件,实现仿真信号源功能,从而达到系统回路测试验证目的。

2 系统架构

系统基本架构由 I/O 设备层与监测控制层构成(图 1),采用冗余以太网网络架构。

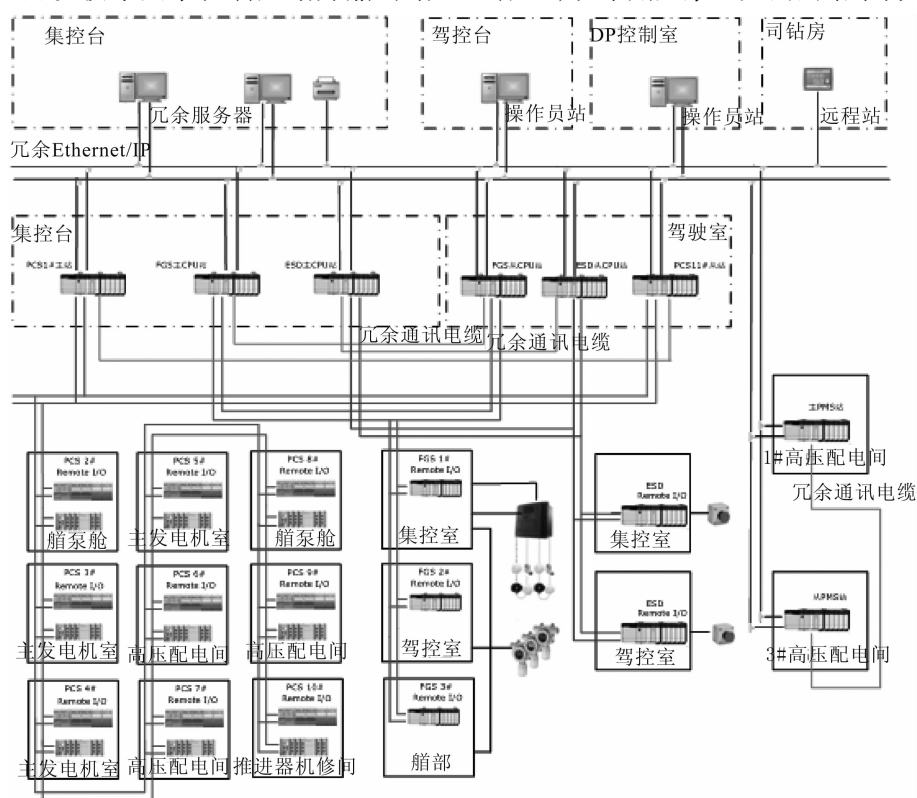


图 1 钻井船仪表控制系统图

监测控制层负责数据汇总和分系统间的数据交换及实现 I/O 过程控制。采用安全过程控制器形成工艺过程控制系统及安全保护系统（应急关断系统 ESD、火气系统 FGS）。同时，针对现场区域划分设置集控室冗余服务器、驾控室操作员站及 DP 室操作员站，实现对系统的监控，以及操作员与系统的人机交互对话，完成常规控制及与生产管理和性能监视相关的功能。

I/O 设备层包括仪表、执行机构、驱动器等，负责数据采集和执行机构控制，由 16 个位于现场的数据采集站及相关附属设备构成，分别针对不同现场设备实现监测及控制功能。同时，针对各自不同的功能划分，又将数据采集站分别列入 DCS 系统、ESD 系统及 FGS 系统。

3 系统组成及主要功能

钻井船仪表控制系统由过程控制系统和安全保护系统组成，安全保护系统又包括应急关断系统和火气探测系统^[2]。

基于钻井工艺过程的自动化监控要求以及船级社规范要求，分析得出深海钻井船仪表过程控制系统设计输入，对过程控制系统进行软硬件设计和控制策略设计，动态显示钻井工艺过程的状态及主要工艺参数。控制系统的报警参数和 PID 控制参数可以在线修改，监视主要生产设备的运行情况，处理报警等。钻井工艺主要流程环节包括：钻井系统、固井系统、泥浆泵系统、动力系统、发电及分配系统等。

应急关断系统是独立的系统，除了作为正常操作、控制和检测的系统和设备，它还能在控制系统或设备发生故障或错误操作时充当独立的保护设备。应急关断分为 4 级关断：ESD-1，弃船关断；ESD-2，火气关断；ESD-3，生产关断；ESD-4，设备关断。

火气探测系统针对生活、生产区域进行火灾监测和气体浓度监测。涉及的现场设备有火焰探头、可燃气体探头、手动火气报警按钮等。由火气探测系统完成所有现场的火灾和气体传感器信号的采集、执行逻辑表决及火灾或气体泄漏确认，并通过安全网络传送信号，启动 ESD-2 级关断，同时触发操作站警报及相应的风机、风门关断与过程控制系统警报。该系统与消防、通风设备、报警设备等系统留有接口。

硬件在环仿真测试平台包括：针对钻井船的仪表控制系统的各个子系统的仿真测试平台以及相应数据仿真服务器。

3.1 过程控制系统功能

本系统采用冗余架构，其基本结构包括：2 个互为冗余的控制器框架，分别安装于驾控室和集控室；1 个与人机界面相连的上位 HMI 网络；9 个远程 I/O 机架。其中，控制器、通信模块、冗余模块均采用 1756 系列控制器，远程 I/O 站采用 1794 Flex I/O 模块，串口模块采用 MVI56-MCM。工作站通过 Ethernet/IP 与冗余控制器相连，冗余控制器通过环形以太网与远程 I/O 机架相连，满足冗余处理器、冗余电源及冗余通信的要求。

DCS 系统可以监测和控制各分系统的运行。系统主要部件具有冗余功能，任何主要设备发生网络故障时都能不间断地转换到后备系统；可在 MIMIC 图上显示报警信息。系统在控制室、司钻房等设显示终端。

该系统基本要求是将分系统功能集中在一起，在通常情况下可代替与这些系统相关联的分布式控制盘对生产系统进行监控。这些系统在 PCS 系统内相互联系，但不受干扰。

(1) 控制监测功能

钻井船生产工艺系统比较复杂，被监控设备如下：钻井系统、泥浆循环净化系统、固井系统、测井系统、试油系统、井口系统、定位系统、垂荡摇摆补偿系统、动力系统、起重系统和救生系统等。

由于钻井船 DCS 系统功能相对独立，所以大部分系统的设备配备了独立的就地控制盘，其控制功能由就地控制盘完成。带有就地控制盘的设备将综合报警、生产设备的运行/停止等信号通过远程 I/O 发给监控系统，监控系统不再对其内部的参数做具体控制。

(2) 图形显示

报警记录及状态显示的操作员站（与其他系统的 HMI 共享）、控制器通过环形以太网与其他控制器以及工作站/服务器进行数据交换。过程控制系统界面如图 2 所示。



图 2 过程控制系统界面

(3) 报警监测功能

该功能包括: 监视现场设备运行状态以及系统通讯状态; 对设备故障状态进行声光(界面信号灯以不同颜色进行闪烁并发出报警声音)报警; 报警消音, 报警单条应答及组应答; 报警限值在线修改; 报警屏蔽; 报警消息筛选排序; 报警消息打印及报警数据归档。

(4) 历史纪录

存储设备运行监测点的历史数据, 供操作员及生产人员查阅使用。

(5) 打印功能

操作站连接到 EtherNet 网络打印机, 打印报警记录和操作记录。

3.2 应急切断系统功能

ESD 系统对生产过程的独立设备或过程单元提供自动关断功能, 即一个有结构的关断层次会被手动或自动发动执行。

低级别的关断不能引起高级别的关断, 而只能触发比它更低级别的关断。所有应急关断系统的 DI/DO 信号都须采用硬线连接。

应急关断系统一般包括工艺处理子系统应急切断(PSD)和船舶子系统应急切断(VSD)两部分。前者专用于保证原油工艺处理模块的安全, 而后者主要负责工艺处理模块外全船其余部分的安全。PSD 子系统的设计以原油处理流程的特点和业主的使用习惯为设计依据。VSD 子系统的主要功能为生产保障部分的火气关断, 其设计原则是在保证安全的前提下, 尽量减小对生产的影响。PSD 保留与 VSD 的接口和逻辑关系。

ESD 系统分四级关断: ESD-1 弃船关断、ESD-2 火气关断、ESD-3 生产关断、ESD-4 设备关断。1 级关断由位于中控室的一级关断手动按钮或位于主逃生线路上的 1 级关断站手动触发。1 级关断将会引发: 2 级关断; 10 min 后, 关断应急发电机; 60 min 后, 关断 UPS; 报警广播。2 级关断触发原因包括: 1 级关断; 位于中控室的手动按钮; 在特别重要的地方有气体泄漏; 火气系统探测到发生火灾。2 级关断将会引发: 3 级关断; 打开所有的放气阀; 关闭所有的安全阀、泵; 相关系统/设备的关断; 报警广播。当 2 级关断发生时, 消防设备和基本通信设备仍然有效。3 级关断触发原因包括: 1~2 级关断; 位于中控室的手动按钮; 主电源失电; 光缆通讯中断超过 10 min; 重要的过程设备出错。3 级关断将会引发: 4 级关断; 关闭所有的安全阀和泵; 关闭流水线上的阀; 报警。当 3 级关断

发生时, 消防设备和基本通信设备应该仍然有效。4 级关断触发原因包括: 1~3 级关断; 设备工况不正常。4 级关断将会引发: 设备关断、报警^[3]。

ESD 系统包含以下功能:

(1) 图形界面显示

报警记录、状态显示的操作员站(与其他系统的 HMI 共享)安装 Rockwell 的 HMI 组态软件。控制器通过冗余的以太网与该平台上其他控制器以及工作站/服务器做数据交换。考虑应急关断系统的独立性和安全性, HMI 通过网络直接连接到 CPU, 与处理器进行通讯。

(2) 复位

所有关断都须手动复位, 1 级和 3 级复位按钮位于应急关断矩阵控制板上, 2 级复位按钮位于各个重要火气报警的现场, 4 级关断复位可通过人机界面实现。

(3) 扫描

ESD 系统扫描时间小于等于 500 ms。

(4) 自诊断

该系统具有自诊断能力, 包括: 输入输出通道诊断、看门狗、上电初始化检查、通讯故障检查、断线检查。

3.3 火气探测系统功能

FGS 系统主要通过现场的探测单元对探测区域的火灾情况和气体泄漏情况进行监测, 并将信息传至系统控制处理单元, 对事故状况进行显示并做出相应的联动信号输出。前端探测单元由感烟探头、感温探头、按钮以及气体探测器组成。系统控制处理单元主要处理并显示前端探测单元的探测信息, 并与消防、通风、报警等系统留有联动接口。一旦发生火灾或气体泄漏报警, 系统会根据设置的信号激活条件将报警信号传送至各联动系统; 并将报警信号送至应急关断系统, 同时触发操作站报警并使相应的风机、风闸执行关断等动作。

火气探测系统根据系统功能主要由气体探测报警、火灾探测报警及火气辅助设备关断三部分组成^[4]。

(1) 气体探测报警

气体探测报警系统主要功能是对钻井船上危险工作区域及部分生活区域内的可燃气体或有毒气体浓度进行监测。前端的可燃气体探头和硫化氢气体探头实时采样, 一旦气体浓度达到设定报警值, 采样探头会将信号传送至控制单元, 控制系统显示报警信息并发出报警, 同时输出联动信号。

(2) 火灾探测报警

火灾探测报警系统（图 3）主要功能是对钻井船上主要设备区域、人员居住区域以及逃生区域的火灾情况进行监测。系统主要由火灾报警控制盘、感温探测器、感烟探测器、手动报警按钮及警铃等组成。前端探测单元将现场监测信息传送至系统控制盘，控制盘将信息通过串口通讯传送至 ESD 系统。

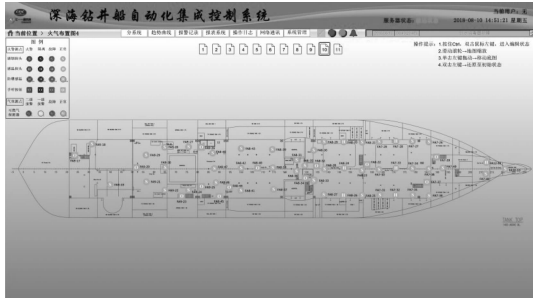


图 3 火气探测系统界面

(3) 火气辅助设备关断

火气辅助设备关断系统主要功能是接收到火气确认报警信号和气体报警信号时，安全控制器根据火气关断的因果逻辑关系，执行相应的风机、风阀、空调等设备的关断。

4 钻井船自动化系统仿真验证

为了准确验证钻井船自动化系统的控制效果及安全切断策略的有效性，搭建了硬件在环仿真测试平台。

仿真系统由一台仿真服务器（含画面服务，模拟输出 PCS、ESD、FGS 系统的传感器信号）和二个 I/O 分站组成。采用上海船用柴油机研究所自研的 HTS4000 系列通用 PLC 搭建。测试平台以组态王 kingview6.5 为软件平台，通过 PLC 的 DI/DO/AI/AO 等输出通道模拟传感器信号和执行机构反馈信号，对系统样机进行功能及性能测试。

另外还配备了一台具有以太网及串口数据发送功能的数据仿真机，模拟输出船舶公共系统的仿真数据，测试大系统网络性能和上位机软件的大容量数据处理能力。

该仿真系统由仿真模型、仿真接口和仿真监控画面显示三部分组成；具有显示船上各设备相关参数及手动设置故障等相关功能。仿真系统通过 IO 硬线、Modbus、以太网三种接口形式与样机对接测试。通过该测试系统所有测试信号一次性直接对接，相比传统测试过程逐点用信号发生器输入样机进行测试，测试效率提高。同时，该系统通过多种接口同时输入样机测试中所需测点数据，方便观察多个系统间交互情况，可直观地在仿真画面中观察

到某些操作或故障输入引起的控制效果^[5]。具体接口形式及实现功能如表 1 所示。

表 1 仿真系统接口形式及实现功能

接口形式	实现功能
IO 硬线	共约 600 点。通过仿真程序模拟深海钻井船生产系统各子系统功能及须要采集和控制的参数，下发至 PLC 输出，使样机 PCS、ESD、F&G 可以采集到真实的数据反馈，从而进行控制策略和关断策略的优化研究。
Modbus	通过仿真程序模拟深海钻井船生产系统各子系统功能及须要采集和控制的参数，下发至 Modbus 接口；模拟发送机舱辅助设备、液位等串口数据，及模拟 PMS、ESD、FGS 等各类主要设备串口数据，对样机自动化系统数据解析能力和控制策略、关断策略进行测试。
以太网	基于仿真机用以太网仿真发数的方式与样机数据采集网络进行连接，主要模拟机舱设备的温度、压力以及泵、风机等的起停运行等；保证系统 15 000 点的总容量指标；测试样机系统的大数据处理、存储能力以及以太网的安全稳定性。

(1) 变量查找测试

变量查找功能通过输入变量描述查找到该变量的对应位置并跳转至相关页面。点击变量查找按钮后，在弹出页面的关键字中输入变量的描述名，点击查找，即可找到包含关键字的变量。

(2) 变量输出测试

仿真界面监视仿真站的 DI、DO、AI 和 AO 硬点的状态和数值，并在组态画面上显示。在组态画面中打开/关闭 DI/DO 变量状态，连接仪控系统的相应的通道输出随之变化，可在钻井船仪控系统监控画面观察到阀开/阀关等动作；在组态画面中给 AI/AO 变量置值，则可在钻井船仪控系统监控画面观察到相应设备液位、温度等的变化情况。

(3) 故障注入及触发

关断系统和火气探测系统中大量的故障触发条件，以及过程控制系统中由于管路阀门开关引起的液位、温度变化等，可定义为触发不同级别报警或关断条件的故障。预留故障条件输入接口，可测试关断逻辑是否合理，如图 4 所示。

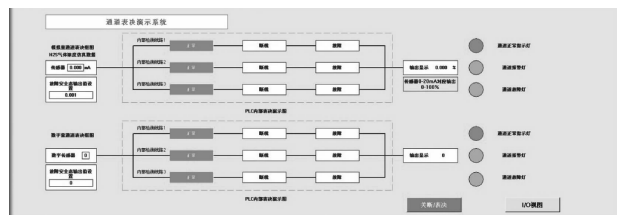


图 4 表决测试

(4) 运行模型

设备建模后成为设备模块，该模块根据事先注

入的算法在仿真平台中自动运行，模拟生产过程中各种连续运行的设备，如泥浆罐等。多个设备模块组成大的生产系统。同类模块设计好后可以实现重用。仿真的生产系统运行平稳，便于工程师测试各类控制算法，进行工艺控制优化。

(5) 显示界面

上位机界面可分为两个区域，导览区：主要包含 PCS、ESD 菜单，具有变量查找、数据导出等功能性按键及系统时间；页面区域：主画面显示和控件操作区域。

5 结论

本文根据钻井船等海工装备的自动化仪表控制系统的功能需求，并结合船检规范，设计了钻井船仪表控制系统。该系统采用网络冗余的分布式控制和具有安全等级的安全控制器搭建，满足钻井生产过程监控需求和石化生产过程火气安全切断要求，确保船员和生产安全。钻井船仪控系统涉及的工艺过程控制和安全切断等控制策略复杂，难以通过普通测试仪表直接测量，为此搭建了半物理仿真验证

平台，基于以太网、串口等通讯，模拟各种生产过程中可能的故障，验证安全系统关断逻辑的正确性。结果表明：钻井船仪表控制系统样机的过程控制和安全系统的控制策略、关断策略安全有效；无线通讯和管理软件、报表分析、趋势预测等功能与实船需求相匹配。

参考文献

- [1] 曲媛. 深海钻井船的总体方案分析研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] 赵传亮, 张树立, 王嘉波. 钻井船钻井模块研究 [J]. 装备制造技术, 2017 (7): 121-123.
- [3] 倪明杰, 丁才发. FPSO 应急关断系统研究 [J]. 船舶, 2001 (1): 49-52.
- [4] 邹成业. 半潜钻井船的总体方案分析研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [5] RAHMAN M A, OSHEIBA A M, RADWAN T S, et al. Modelling and controller design of an isolated diesel engine permanent magnet synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11 (2): 324-330.

(上接第 11 页)

6 结论

L20V190 天然气发动机从设计开始就严格按照标准发动机开发流程进行。L20V190 天然气发动机作为功率拓展新产品，虽然涉及的新前沿技术不是十分突出，但围绕密封、维护保养、HSE 等方面的一系列改进设计紧紧贴合了用户需求，并保证了产品的市场竞争力，同时也为下一代天然气发动机的产品开发提供了很好的参考。

参考文献

- [1] 中国石油集团济柴动力有限公司. L20V190 天然气发动机整机计算报告 [R]. 济南: 中国石油集团济柴动力有限公司, 2018.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 杨连生. 内燃机设计 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.