

水下生产复合电液控制系统 液压分析方法研究

朱莉娅, 安维峥, 孙 钦, 洪 毅

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要

水下控制系统液压分析是水下生产系统设计的核心技术之一, 它是确定控制系统液压设施配置的必要前提。我国海洋石油设计人员经过数年学习积累已具备控制系统液压分析的基本能力, 并在多个水下油气开发项目中独立完成该项工作。基于实际项目经验并结合最新国际标准, 论文针对应用最广的复合电液控制系统进行了液压分析方法的梳理, 从液压分析的目的与内容及评价准则、液压分析软件、液压分析典型思路、液压分析典型阀门参数、液压分析实际案例等方面进行了阐述, 可为今后水下控制系统设计提供参考。

关键词: 水下生产; 复合电液控制; 液压分析

中图分类号: TE952

文献标志码: A

0 引 言

水下生产控制系统肩负着保障水下油气田安全运行的重任, 是水下生产系统与上部设施沟通的桥梁。根据水下执行机构驱动方式和数据传输模式, 可将水下生产控制系统分为全液压控制、电液控制和全电气控制这 3 类, 其中电液控制系统又可细分为直接电液控制和复合电液控制^[1]。目前应用比较广泛的是复合电液控制系统^[2], 故本文以该系统为对象, 开展液压分析方法的研究。

复合电液控制系统的液压设备主要包括: 液压动力单元 (hydraulic power unit, HPU)、水上脐带缆终端 (topside umbilical termination assembly, TUTA)、脐带缆液压管线、水下脐带缆终端 (subsea umbilical termination assembly, SUTA)、液压飞线 (hydraulic flying lead, HFL)、水下控制模块 (subsea control module, SCM)、带液压执行机构的阀门等。在水下油气开发项目设计阶段, 需依据相关设计规范和采用专业软件来搭建系统模型, 并遵循科学方法, 进行控制系统液压分析, 以保证液压设施配置满足项目需求。

在我国早期水下油气开发项目中, 水下生产控制系统的液压分析工作通常委托给国外设计公司负责。直至中海油南海某气田群开发项目, 我国海洋石油设计人员才首次自主完成了基本设计阶段的水下控制系统液压分析。本文结合近期水下油气开发项目的工程经验以及最新版本的国际标准, 对水下生产复合电液控制系统液压分析方法进行详细梳理; 内容具体划分为液压分析目的、内容及评价准则, 液压分析软件, 液压分析典型思路, 液压分析典型阀门参数, 液压分析实际案例等 5 个部分。

1 液压分析目的、内容及评价准则

1.1 液压分析目的

液压分析通常在项目基本设计阶段或 FEED (front end engineering design) 阶段启动。其主要目的在于根据项目实际情况 (包括水深、环境温度、井压、水下设施分布位置、采油树数量、采油树阀门功能等), 模拟不同配置下控制系统的功能表现, 进而给出液压设施推荐配置, 包括高压/低压液压管线尺寸、HPU 供给储罐/回流储罐尺寸、HPU 高压/低压蓄能器尺寸、HPU 高压/低压增压泵流量与启停压力、SCM 高压/低压蓄能器容积与预充压力、是否需要设置就地泄放阀等。

1.2 液压分析内容

液压分析遵循的国际标准为 API 17F Standard for Subsea Production Control Systems, 目前最新版本为 2017 年第四版^[3]。涉及液压分析的国际标准还有 ISO 13628-6^[4]等, 第一版及第二版的 ISO 13628-6 均等同采用 API 17F, 而 API 17F 第三版及第四版公布后, ISO 13628-6 尚未更新, 故本文后续内容均以 API 17F 为参照。

根据 API 17F 中 4.5.4.2 Hydraulic Systems 章节^[3], 液压分析的主要工作内容 (主要仿真工况) 包括:

- (1) 低压液压系统充压;
- (2) 高压液压系统充压;
- (3) 操作采油树各阀门, 包括各尺寸的闸阀、井下安全阀、生产油嘴阀等 (最小/最大流程压力下阀门开启/关闭、阀门开启后压力恢复、阀门操作带来的压力波动对其他就位阀门的影响);
- (4) 操作一整棵采油树;
- (5) 低压液压系统泄压;
- (6) 高压液压系统泄压;
- (7) 操作水下生产控制系统中的其他重要阀门。

1.3 液压分析评价准则

1.3.1 液压系统设计的要求

根据 API 17F 中 4.2.5 Robustness of Hydraulic System 章节以及 4.3.2.2 System Pressure Ratings and Performance Requirements 章节^[3], 关于液压系统的主要设计要求如下所述。

- (1) 在所有操作模式中, SCM 内部压力值应始终保持在可接受状态。
- (2) 系统内任何阀门的单独操作不应引起其余阀门的意外动作。
- (3) 关于系统各项压力的设定, 系统设计压力 (design pressure, DP) /主泄放装置最大设定泄放压力为 100%, 则最大泄放压力/泄放过程中 HPU 的最大压力为 110%, 泄放装置最小复位压力为 95%, 最大操作压力/正常工况下 HPU 的最大正常输出压力应至少比泄放装置最小复位压力低 5%, 即为 90%。
- (4) DP 应遵循标准规定的压力系列值, 该压力值是指内部与外部的名义压力差值。
- (5) 系统组件的设计压力应大于等于系统设计压力。
- (6) 在确定系统设计压力时, 如存在井下安全阀 (surface controlled subsurface safety valve, SCSSV) 或其他液压驱动井下执行机构, 则应考虑水深、井深、采油树工作压力等。
- (7) 系统压力泄放装置, 通常为系统压力泄放阀, 应设置在 HPU 处, 且设定泄放压力不高于系统设计压力。
- (8) 系统压力泄放装置应限制 HPU 最大泄放压力不超过系统设计压力的 110%。

(9) 系统最大操作压力应至少比泄放装置最小复位压力低 5%。

(10) 系统最大操作压力的设定应保证水下最大液压的压力差(液压控制液与海水静压之差)不超过系统设计压力。

(11) 供给 SCSSV 的最大操作压力不应超过 SCSSV 设计值。

(12) 系统应具备足够的容量, 为阀门操作提供所需的压力及液量。连续操作多棵采油树, 操作时间间隔应由作业者确定。

(13) 在操作阀门的过程中, 水下瞬态就地液压的压差应不低于最小操作压力, 而最小操作压力应取以下两者中高值:

① 方向控制阀(direction control valve, DCV)最大起跳压力的 150%;

② 执行机构弹簧返回侧最大开始关闭压力的 100%。

(14) 应保证液压回路侧压力不超过其设计压力, 如采用闭式液压系统, 应考虑采用回路蓄能器, 从而减小回路瞬态压力激增。

1.3.2 操作时间及压差设计要求

API 17F 对液压系统操作时间无具体设计要求。在中国海油典型水下油气开发项目中, 对控制系统的液压操作时间及压差设计要求进行统计, 如表 1 所示。

表 1 液压操作时间及压差设计要求统计

项目名称	阀门开启时间/s		系统放空时间/min	系统充压时间/min	水下控制模块压差/bar
	井下安全阀	其他阀门			
荔湾 3-1	< 15	10 ~ 30	30	60	90
流花 4-1	20	20	30	40	105
流花 19-5	< 15	45	45	60	135
番禺 35-1/35-2	< 15	30	60	30	100

1.3.3 液压动力单元设计要求

根据 API 17F 中 5.4.6 Hydraulic Power Unit 章节^[3], 液压动力单元 HPU 的主要设计要求如下所述。

(1) HPU 的关键部件(例如泵、过滤器等), 应冗余配置。

(2) 对于 HPU 蓄能器, 其预充氮气压力应明显低于正常液压操作压力, 从而保证在泵故障时液压系统储能最大。蓄能器容积应足够大, 当无外界补充时能够操作单棵采油树中所有阀门的开启、关闭; 且当 HPU 泵出现故障时, 在 12 个小时内维持系统压力及相关阀门开启状态、避免泵因频繁起停而损害其使用寿命。

(3) 当一个蓄能器故障时, 系统容量损失应不超过 50%, 且输出压力不应低于维持系统运行的最低值。

(4) 应考虑操作压力、泵起停压力、泄放压力的设置, 保证足够的操作裕量。

(5) 供给储罐和回流储罐应分开设置。供给储罐的容积应不小于全系统充压加上操作一遍所有阀门所需液压液容量的 1.5 倍。如供给储罐容积大于等于 2 000 L, 则考虑 750 L 裕量。

2 液压分析软件

自 2010 年起, 我国海洋石油设计人员开始参与水下生产控制系统设计工作, 典型项目情况统计如表 2 所示。主要采用的液压分析软件为 CS 和 SimulationX (均为成熟商业软件)。

表2 水下生产系统典型项目情况统计^[5-6]

序号	项目名称	投产时间(年)	水深/m	水下采油树数量	液压分析软件
1	流花 4-1 油田	2012	260 ~ 300	8	SimulationX
2	崖城 13-4 气田	2012	90	3	SimulationX
3	荔湾 3-1 气田	2014	1350 ~ 1500	8	CS
4	流花 19-5 气田	2014	181	2	SimulationX
5	番禺 35-1/35-2 气田	2015	195 ~ 338	7	CS
7	文昌 9-2/9-3/10-3 气田	2018	142	4	SimulationX
8	流花 16-2/20-2-21-2 油田	2020	387 ~ 435	26	SimulationX
9	陵水 17-2 气田	2021	1220 ~ 1545	16	SimulationX

CS 软件由美国 ILS 公司开发,可满足海洋石油工程长距离水下液压控制系统的仿真需求,但不具有扩展性,建模灵活性差,只能使用软件自带的元件,无法修改元件属性定义。

SimulationX 软件由德国 ITI 公司开发,作为从一维到三维的多学科仿真平台,应用领域广泛。其中包含海洋及近海工程的深海液压仿真元件库,建模灵活性较好,输入参数和变量管理方便,支持与 Matlab-Simulink 等其他软件联合仿真。

目前,我国水下油气开发项目中主要采用 SimulationX 进行控制系统液压分析,本文后续内容将以此为参照。

3 液压分析典型思路

如 1.1 节所述,在液压分析时需要模拟液压设施在不同配置下控制系统的功能表现。由于液压设施的种类和参数较多,潜在的配置组合数量很大,再加上液压分析仿真工况较多,如果不进行适当筛选和简化,计算工作将相当繁重。事实上,每个实际项目在进行水下控制系统液压分析时都会采取一定的简化措施,并遵照一定的原则进行计算。在南海某气田开发项目中,水下生产系统水深超过 1000 m,回接距离超过 100 km,其液压分析思路比较典型、借鉴意义较大,下面将对这方面的内容进行介绍。在实际项目工作中,可根据具体项目情况,灵活调整分析思路。

(1) 在进行仿真建模之前,根据环境条件、液液性质,确定液压回路为开式回路;根据水深、回接距离及井数,初步确定 HPU 高压/低压蓄能器和泵的参数。

(2) 由于是深水且回接距离长,假设单个阀门操作主要受 SCM 蓄能器容积和预充压力的影响,而液压管线的影响可以忽略。通过模拟最大尺寸阀门操作过程,确定所需 SCM 蓄能器容积和预充压力的最小值、将其作为后续计算的基础。

(3) 仅考虑最远位置的 SCM,模拟操作最大尺寸阀门后的 SCM 蓄能器的压力恢复过程,判断不同材质、尺寸的液压管线是否满足要求。

(4) 假设所有 SCM 均处于最远位置,模拟系统 ESD 过程,判断不同材质、尺寸的液压管线是否满足要求。由于各种材质与尺寸组合对应的 ESD 时间均超过 30 min,建议在 SCM 处设置快速泄放阀。

(5) 假设所有 SCM 均处于最远位置,模拟系统充压过程,判断不同材质、尺寸的液压管线是否满足要求。由于满足充压时间在 60 min 以内的液压管线尺寸较大,并且该工况在正常运行时不会出现,建议充压时间仅作为选择液压管线尺寸时的参考因素(而非决定因素)。

(6) 根据上述第 (2) 步至第 (5) 步的计算情况, 校核 HPU 高压/低压蓄能器和泵的参数初始设置是否合适。

4 液压分析中典型的阀门参数

在采用 SimulationX 进行液压分析时, 需要对阀门参数进行定义。在中国海油实际项目中应用的典型阀门参数如表 3 和表 4 所示。

表 3 典型阀门 (5" 闸阀) 参数

参数	数值	参数	数值
活塞直径/cm	20.0	完全开启弹簧力/kN	93.7
阀杆直径/cm	7.0	井压为 32.5 MPa 时“夹点”前摩擦力/kN	73.8
阀门行程/cm	14.8	井压为 32.5 MPa 时“夹点”后摩擦力/kN	6.8
“夹点”前阀门行程/cm	1.3	井压为 0 时摩擦力/kN	6.3
初始开启弹簧力/kN	49.9	移动部件质量 (活塞、闸板及 1/3 弹簧)/kg	100

表 4 典型阀门 (井下安全阀) 参数

参数	执行器			初始开启压强/MPa	完全开启压强/MPa
	体积排量/cm ³	有效面积/cm ²	行程/cm		
数值	36.9	6.5	5.7	33.1	34.4

5 液压分析实际案例

中海油某气田位于南海西部, 水深约 1500 m, 采用 16 棵水下采油树, 依托半潜式浮式平台进行开发。其水下生产设施布置如图 1 所示, 依此搭建水下生产控制系统液压分析仿真模型。图 1 中 SEMI 为半潜式浮式平台, UMB 为脐带缆, SDU 为水下分配单元, SUTU 为水下脐带缆终端单元, FL 为飞线 (长度 100 m), A1~A16 为采油树编号, W1~W2、E1~E3 为管汇编号。

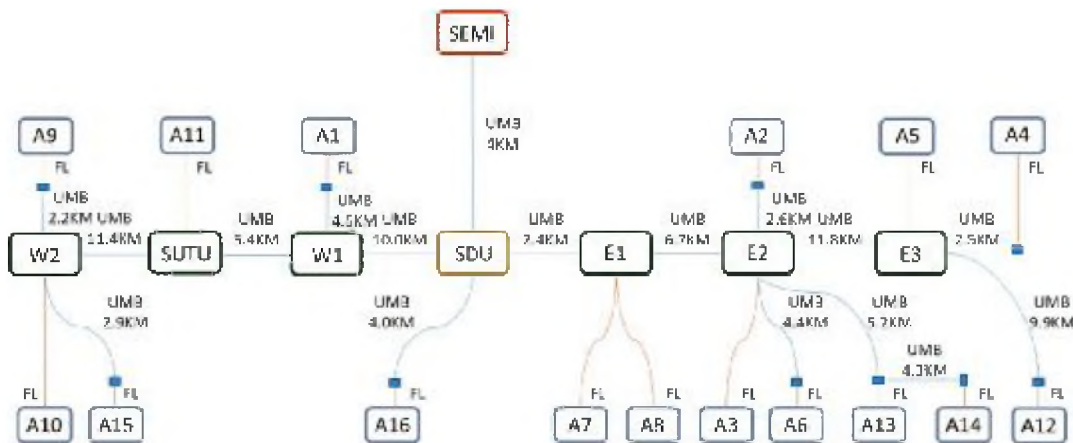


图 1 中海油某气田水下生产设施布置示意图

基于仿真模型, 调整液压设施参数, 对采油树阀门操作、系统充压、系统放空等工况进行模拟分

析,部分仿真结果如图2所示。

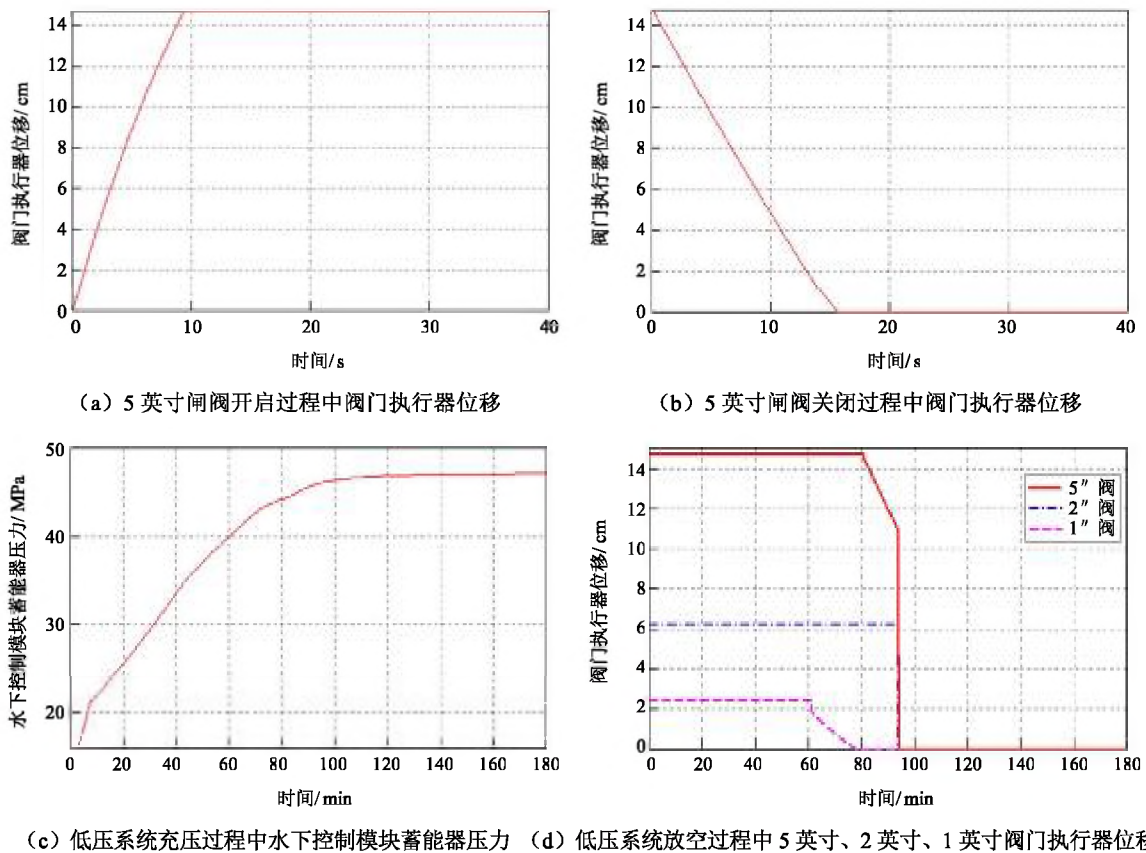


图2 水下生产控制系统液压分析部分仿真结果

可以看出,在这种液压设施配置下,采油树阀门的开启及关闭时间能满足要求,但低压系统充压和泄压时间大于通常的操作要求。为改善这一现象,可增大脐带缆液压管线尺寸;但本项目回接距离长达数十公里,采用该方法会明显降低项目经济效益。由于系统充压工况仅在气田投产初期、停产后复产等情况下出现,次数非常有限,对充压时间稍长还是可接受的;至于缩短系统放空时间,可通过设置水下就地泄放阀来实现,该方法可靠,且费用较低。

该项目邀请某国际设计公司对水下生产控制系统液压分析进行第三方验证,其仿真结果及分析结论与我方一致,从侧面印证了我方采用的分析方法的适用性。

6 结 论

本文针对复合电液控制系统梳理了液压分析的基本方法,主要结论如下:

- (1) 鉴于目前还没有适用的关于水下生产电液控制系统的国内标准,液压分析的工作内容及评价准则需遵循国际标准相关规定。
- (2) 液压分析的工作思路应借鉴以往类似项目经验,并结合实际项目的特点进行调整。
- (3) 液压分析中,阀门参数的定义需要与时俱进,随着水下生产系统设施国产化工作的推进,应将国产阀门纳入考虑范围。
- (4) 液压分析的计算结果应尽量进行多方对比,包括与以往项目的对比、与第三方设计的对比、

与实际测试结果的对比等。在印证计算结果可靠性的同时, 充实基础数据库和完善分析方法。

参 考 文 献

- [1] 《海洋石油工程设计指南》编委会. 海洋石油工程深水油气田开发技术[M], 大庆: 石油工业出版社, 2007.
- [2] 胡雪峰, 封延松. 电液复合式控制系统的组成及分析工况[J]. 中国造船, 2012, 53(S1): 189-199.
- [3] API Standard 17F. Standard for subsea production control systems[S]. Fourth Edition, 2017.
- [4] ISO 13628-6 Petroleum and natural gas industries — design and operation of subsea production systems — Part 6: Subsea production control systems [S]. Second Edition. 2006.
- [5] 侯广信, 安维崢, 孙钦, 等. 水下复合电液控制系统液压控制响应分析[J]. 石油机械, 2015, 43(6): 40-45.
- [6] 冒家友, 阳建军, 王运. 流花 4-1 油田水下复合电液控制系统设计与应用[J]. 中国海上油气, 2014, 26(3): 111-114.

Investigation of Hydraulic Analysis Method in Compound Electro-Hydraulic Control System for Subsea Production

ZHU Liya, AN Weizheng, SUN Qin, HONG Yi

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract

Hydraulic analysis of subsea control system serves as one of the core technologies of subsea production system for determining the hydraulic equipment configuration in the design stage. Through years of learning, offshore oil designers in China have possessed basic ability in hydraulic analysis of a control system and have completed this task in several subsea oil & gas development projects. Based on the project experiences and with reference to the latest international standard, hydraulic analysis methods widely applied in compound electro-hydraulic control system are elaborately discussed in the present study, including the purpose, content and evaluation criteria of hydraulic analysis, commonly used software, typical analysis logic, typical valve parameters, and practical cases. Research results can provide a reference for future design of subsea control systems.

Key Words: subsea production; compound electro-hydraulic control; hydraulic analysis

作者简介

朱莉娅 女, 1990年生, 工程师。主要从事海洋石油天然气开发工程设计。

安维崢 男, 1979年生, 高级工程师。主要从事海洋石油天然气开发工程设计。

孙 钦 男, 1975年生, 高级工程师。主要从事海洋石油天然气开发工程设计。

洪 毅 男, 1966年生, 教授级高级工程师。主要从事海洋石油天然气开发工程设计。