

# 浅水受限区水下油气田开发方案

孟凡然<sup>1</sup>, 张重德<sup>1</sup>, 曹永<sup>2</sup>, 张文龙<sup>3</sup>, 王刚<sup>3</sup>, 贾鹏<sup>3</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459; 2. 中国海洋石油工程股份有限公司, 天津 300459; 3. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对国内浅水油气资源开发环境影响及空间受限等问题,本文提出了国产浅水水下生产系统的总体设计方案。通过对浅水水下生产系统关键设备结构进行分析,提出了一种满足受限区海域开发要求的环境友好型设计思路。结果表明:通过系统和总体布置的设计,国产浅水水下生产系统与深水相比在单体重量、作业方式、维护检修方面更加经济。

**关键词:**浅水采油树; 浅水水下控制模块; 水下防护结构; 浅水水下生产系统; 水下管汇; 湿插拔水下电连接器; 水下湿插拔液压连接器; 节流阀

DOI: 10.11990/jheu.202209040

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240304.1618.002>

中图分类号: TE54 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2024)04-0779-07

## Development of underwater oil and gas fields in restricted shallow waters

MENG Fanran<sup>1</sup>, ZHANG Chongde<sup>1</sup>, CAO Yong<sup>2</sup>, ZHANG Wenlong<sup>3</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>, JIA Peng<sup>3</sup>  
(1. CNOOC Tianjin Branch, Tianjin 300459, China; 2. China Offshore Oil Engineering Corp. Tianjin 300459, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In light of the environmental implications and spatial constraints associated with the extraction of China's oil and gas resources in shallow waters, this paper proposes a comprehensive design of the oil and gas production system for China's shallow waters. The paper further examines the key equipment structure of subsea production systems in shallow waters. Based on this analysis, it presents an ecofriendly design that fits the development needs of restricted maritime zones. The findings indicate that through innovative system design and strategic overall layout, the proposed shallow-water subsea production system is more economical in terms of unit weight, operation mode, and maintenance compared with deep-water systems. Ultimately, we emphasize that in order to achieve highly efficient and economically viable development of shallow water oil and gas fields, it remains crucial to persistently strive to tackle key technological challenges of subsea equipment.

**Keywords:** shallow water oil tree; shallow water subsea control module; subsea protective structure; shallow water subsea production system; subsea manifold; wet plug subsea electrical connector; wet plug subsea hydraulic connector; throttle valve

石油和天然气作为重要的能源资源,在社会生产中发挥着重要作用。我国经济的长期稳定增长,对石油和天然气能源的需求不断增加,但石油对外依存度接近70%,保障能源自主安全已成为国家战略<sup>[1]</sup>。2021年我国海洋石油产量达到5760万t,占全国石油增量的80%,海上油气生产已经成为我国能源重要的增长极。我国近海海域存在较多的边界

油气藏,受环境保护、通航条件限制未能充分开发(简称“受限区”),其中渤海受限区的探明石油储量就超过了7亿t,具有巨大的开发潜力。由于受限区内不便设置固定生产平台,将油气生产设施全部设置在水面以下的水下开发方案,对环境和通航的影响较小,是破解受限区油气开发难题的重要突破口。渤海油田作为我国第一大原油生产基地,拥有在生产平台130余座。在渤海海域设置水下生产系统,通过新建海底管缆连接至受限区外的在生产平台,将水下井口产出的油气回接至在生产平台处理,可

收稿日期: 2022-09-16.

网络出版日期: 2024-03-04.

作者简介: 孟凡然,男,高级工程师.

通信作者: 孟凡然, E-mail: mengfr3@cnooc.com.cn.

减少新建设施投资,降低开发成本。开展浅水受限区油气田水下开发技术研究,对加强受限区油气产能,提升国家能源安全储备具有重要意义。

水下生产系统最早应用于 20 世纪 60 年代,美国加利福尼亚海域投产的 Conception 油田是世界上第 1 个全海式水下油田,共有 20 个水下井口,每个水下井口配 2 条专用的生产和注水管线,便于流体的生产、置换和清管操作<sup>[2]</sup>。早期水下井口采油树的结构较为简单,采油树上的阀门通过人工或液压执行机构控制,水下井口的配套管线多,更适合少数水下卫星井口的开发<sup>[3-4]</sup>。随着海洋石油开发技术的不断发展,现代水下生产系统的已发展为电液复合或全电式控制<sup>[5-8]</sup>,其系统集成度、防腐性能、耐压等级、自动化程度和稳定性均有了大幅提升。脐带缆、水下基盘、水下中心管汇、深水软管等水下装备的研发和应用,提升了水下生产系统的集成度,推动了深水油气的大规模水下开发。如我国陵水 17-2 气田共 11 口生产井,设有 4 个丛式井管汇和 1 个海管管汇终端,6 口井通过丛式井管汇回接,5 口井通过海管回接。挪威 Ormen Lange 气田一期,共 17 口生产井,采用 4 个水下基盘管汇开发。

本文基于国内受限区环境特点,提出了一种浅水水下生产系统开发方案,分析了浅水水下生产系统关键装备的特点。根据浅水环境海域渔业、通航、环保和法律法规等要求,对浅水水下生成系统保护结构进行比选。

## 1 浅水水下生产系统开发方案

浅水水下生产系统的开发方案需考虑目标海域的地质、水深、风浪流、井口数量、回接距离、控制方式及通航渔业等因素<sup>[9-10]</sup>。国外主流水下生产系统的控制方式有全液压控制(包括直接液压、先导液压、顺序液压)和电液复合控制<sup>[11-13]</sup>。全液压控制系统的设备造价低,适合少井口、近距离回接的油气田开发,但无法监控水下状态。电液复合控制系统具有回接距离远、响应速度快、水下状态可监控、适合多井口开发的特点<sup>[14-15]</sup>,如表 1 所示。根据我国浅水受限区的探明储量,采用规模化开发的经济性更佳,国产水下生产系统宜选用电液复合控制系统。

表 1 水下生产系统不同控制方案的对比

Table 1 Comparison of different control schemes for sub-sea production systems

| 系统       | 回接<br>距离/km | 响应<br>速度 | 水下状态<br>监控 | 井口<br>数量 |
|----------|-------------|----------|------------|----------|
| 直接液压控制系统 | <3          | 慢        | 无          | 1~2      |
| 先导液压控制系统 | 3~8         | 较快       | 无          | 1~2      |
| 顺序液压控制系统 | 2~3         | 较快       | 无          | 1~2      |
| 复合电液控制系统 | 10~40       | 快        | 有          | 多口       |

电液复合控制系统需要一根多芯电液脐带缆连接水下生产系统与水上生产平台,脐带缆内集成了液压管、化学药剂管、电单元和光单元等,用于传输多种流体介质、通讯和控制信号,如图 1 所示。随着我国综合国力的提升和对水下生产系统科研攻关不断加强,国产脐带缆已在我国南海深水多个油气田开发项目成功使用。国产水下管汇、水下多相流量计的科研攻关也取得突破并相继实现了工程应用。

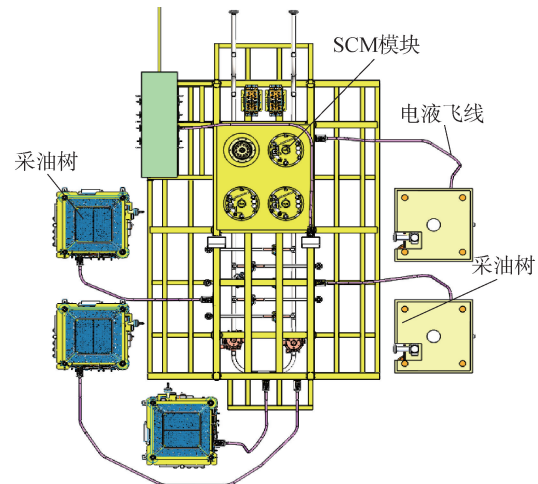


图 1 国产浅水水下生产系统布置

Fig. 1 Layout diagram of domestic shallow water SPS

水下采油树是水下生产系统的关键设备,深水采油树的造价高、体积大、使用半潜式钻井船作业与浅水环境不适配。浅水采油树在尺寸、重量、作业方式等方面进行了重点攻关,使浅水树更加适合自升式钻井船安装和作业,如图 2 所示。浅水采油树主要功能:悬挂油管柱,密封油套管的环形空间,控制和调节油井生产,录取油、套压资料,测试及清蜡等日常生产管理。浅水采油树通过底部的液压或机械连接器与水下井口连接,顶部预留高压立管和工具接口,采油树内部可坐挂油管悬挂器,承担油管的重量,并配合油管悬挂器密封油套环空,顶部安装树帽作为一道压力屏障。与深水树相比,浅水采油树内部液压驱动的阀门数量更加精简,仅将生产主阀(PMV)、环空压力控制阀(AMV)、可回收节流油嘴(Choke)、化学药剂注入阀(CIV)和井下安全阀(SCSSV)设计为液控阀门并配备失压关断功能,其余均设计为手动阀门。手动阀门在正常生产中无需操作,仅在应急工况下需潜水员下水操作。

水下井口产出的油气通过跨接管汇总至水下管汇,再通过海底管道输送至受限区外的在生产平台。根据目标海域的土壤条件和环境数据,深水水下管汇的结构基础形式通常设计为吸力桩或打入桩式,浅水管汇的结构基础通常设计为防沉板式。对比 3 种结构形式,防沉板结构形式的水下管汇具有更好的海上安装效率和经济性,如表 2 所示。

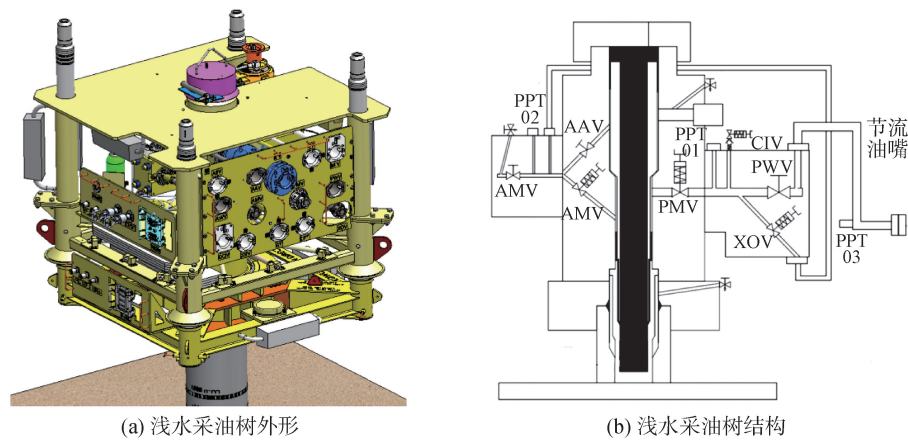


图 2 浅水采油树外形和结构简图

Fig. 2 Outline and structure of shallow water tree

表 2 管汇结构基础形式对比

Table 2 Comparison of manifold base structure

| 特性    | 打入桩                       | 吸力桩                          | 防沉板                     |
|-------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 承载能力  | 垂向、水平承载力强,可承受倾覆力矩         | 垂向、水平承载力强,可承受倾覆力矩            | 垂向承载力强、水平承载力弱,可承受较小倾覆力矩 |
| 安装性能  | 需要打桩锤、安装船<br>安装时间长        | 需要打桩锤、安装船<br>安装时间短           | 需要打桩锤、安装船<br>安装时间短      |
| 适用条件  | 适用多种地基条件,打桩位不能有<br>大厚度岩石层 | 适用多种地基条件,入桩深度范围<br>内不能有高密度沙层 | 适用海底浅层承受力较强的<br>环境      |
| 效率和费用 | 安装时间长、总体费用高               | 安装时间短、制造成本高                  | 安装时间短、总体费用低             |

水下控制模块(subsea control module, SCM)作为水下生产系统的大脑,其内部的水下电子模块可以采集水下设施传感器的信息并上传到水上主控站,也可以接收来自水上主控站的控制命令。通过电磁阀控制其内部的方向控制阀(direction control valve, DCV)动作,对水下液控阀门的控制管路进行加泄压操作,实现对水下液控阀门动作的控制<sup>[16-17]</sup>。水下控制模块设有机械对中机构用于完成本体的就位,底部液压接头的局部浮动结构用于与安装基座的精准对接,楔块式锁紧机构用于可靠锁紧,如图 3 所示。相比深水控制模块,浅水控制模块控制的液压回路数较少,设计裕量充足。在水下系统总体设计宜选用多液压回路、“一个控制模块具备控制多个采油树”能力的设计方案,将控制模块独立于采油树布置在水下管汇内,通过水下电液飞线与采油树连接实现远距离控制,减少水下控制模块的总数量。通过内部结构优化设计,国产浅水控制模块的总体吊装质量在 3 t 以下,满足小型起重船的吊装要求,不需动用大型起重船检修。与深水控制模块相比,浅水控制模块的使用成本和总体经济性更优。

## 2 浅水水下生产系统设计

浅水水下生产系统对环境的影响主要考虑海底

油气泄露和污染的防护,浅水水下生产系统的工艺管道压力等级采用全压设计,即按照最大关井压力设计,确保极端工况下水下设施无油气泄漏。液压控制系统采用闭式回路,液压油采用了化学毒性、降解能力等指标均达到国际权威机构如英国环境渔业与水产养殖科技中心、美国环保局和挪威环保局允许排放的海洋化学品要求的水基液压油,将对环境的影响降到最低。

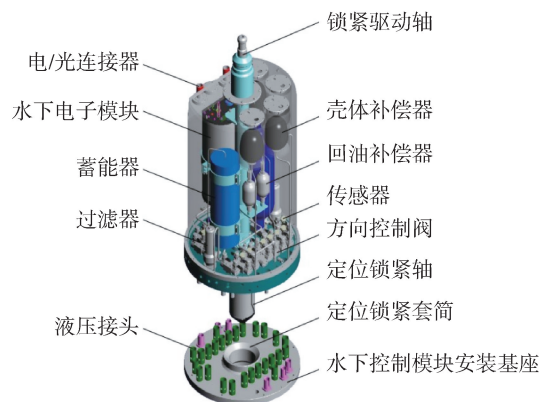


图 3 水下控制模块分解

Fig. 3 Breakdown diagram of subsea control module

浅水水下生产系统对渔业的影响主要考虑渔网拖拽和落物冲击,浅水海域的渔业作业密集,易对水下结构物造成影响,国际标准 ISO13628-1 明确要求水深小于 750 m 的水下结构物应设置防护结

构<sup>[18]</sup>。参照 ISO13628-1 标准推荐的渔网和落物载荷,浅水水下生产系统设置了符合要求的防护结构,如表 3 所示。落物冲击载荷 20 kJ,该结构外表面平滑,四周平面与水平面的夹角小于 58°,渔网从不同方向均可顺利滑过,属于渔业友好型防护结构。

表 3 渔网拖拽及落物冲击载荷

Table 3 Net towing and impact load of falling object

| 水下设备     | 水平力 | 扭转力 |
|----------|-----|-----|
| 水下管汇及采油树 | 400 | 30  |
| 跨接管及飞缆   | 6   | 6   |

浅水水下生产系统对通航的影响主要考虑由船舶航行产生的高频次抛锚落物和小概率沉船冲击的防护<sup>[19]</sup>。目前国内外尚在无通航区设置水下生产系统的工程经验。在水下设施防护研究领域,中铁隧道勘测设计院有限公司和中铁第六勘察设计院集团有限公司设计了一种防护型水下隧道,在水下隧道顶部设置圆形或拱形防护罩,可抵抗沉船和锚击。朱春丽等<sup>[20]</sup>设计了一种带非对称开孔顶盖的水下沉箱结构来防护水下生产系统,并对顶盖可能受到的撞击损伤进行了数值模拟。理论研究的结果显示,将水下生产系统全部设置在海床泥面以下,并使用沉箱防护结构,可有效减少落物冲击的影响,是比较适合通航区水下油气田开发的方案,如图 4 和图 5 所示。国内对水下沉箱用于水下生产系统防护的研究目前正处在方案论证阶段,沉箱形式、基坑开挖、安装方式、管缆回接、接口设计等技术细节正在完善和验证中。

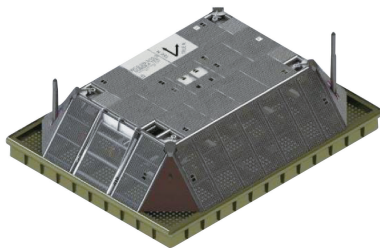


图 4 渔网可滑过的水下防护结构

Fig. 4 Fishing nets can be passed subsea protective structure

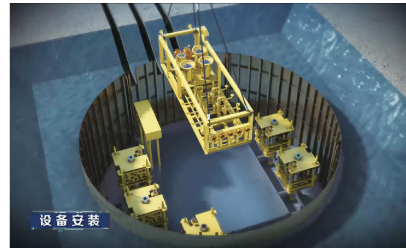


图 5 泥下水下生产系统示意

Fig. 5 Subsea production system under mud

### 3 浅水水下生产系统关键进口零部件国产化技术研究

#### 3.1 水下湿插拔电连接器

水下电连接器用于水下仪器设备的电信号及电能连接传输。配合电缆形成组件,由水下机器人或潜水员操作,可以通过公、母插头插合与分离的方式,在水下环境中实现水下电缆的连接与断开<sup>[21-22]</sup>。其关键技术主要包括水下动态插拔密封技术、高电压绝缘技术、多重压力平衡补偿技术和机械承压技术等。目前国外公司所生产的水下湿插拔电连接器产品已应用于水下生产系统设备。美国 ODI 公司生产的深海电连接器额定工作电流 25~30 A,可承受最大环境压力 64 MPa,设计寿命 30 a,如图 6 所示。图 7 所示为 2 种水下电连接器。德国 Siemens 公司 Digitron3 系列水下电连接器额定工作电流 20~40 A,可承受最大环境压力 30 MPa。德国 GISMA 公司 80 系列水下电连接器额定工作电流 20 A,可承受最大环境压力 30 MPa,设计寿命 25 a。

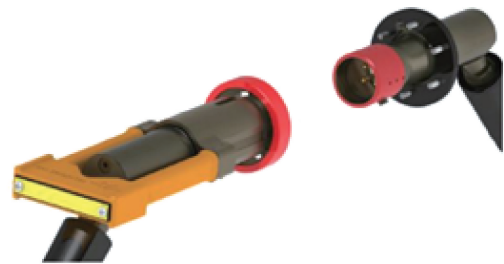


图 6 ODI 深海电连接器

Fig. 6 ODI Deep-sea electrical connector



(a) Siemens公司Digitron3系列

(b) GISMA公司80系列

图 7 2 种系列水下电连接器

Fig. 7 Two kinds of series subsea electrical connector

国内水下湿插拔电连接器需突破的难点:1)电接头在带压插拔、混水液体插拔和水下多次插拔条件下的绝缘强度下降;2)水下湿插拔电连接器接头关键零件加工工艺;3)充油缆成缆工艺。

### 3.2 水下湿插拔液压连接器

水下湿插拔液压连接器用于水下控制模块、液压飞缆(hydraulic flying line, HFL)和采油树穿越器等关键设备与水下液压系统的连接,其核心部件为水下液压接头。一套水下液压接头由公、母接头组成。公、母接头插合后,两端液压接头管路相互导通;公、母接头脱离后,两端液压接头管路分别关闭<sup>[23]</sup>。其关键技术主要包括:液压接头浮动导向对中技术、液压多重动密封技术和

关键密封件制造技术。国内水下湿插拔液压接头研发尚处在起步阶段,产品的耐腐蚀性,密封性,可靠性等关键技术指标有待验证。目前国外水下湿插拔液压接头技术相对成熟,有大量的工程应用。

图8所示为4种水下液压连接器。Morgrip公司生产的水下湿插拔液压连接器工作压力5 000~15 000 psi,操作温度-18℃~121℃,可承受最大环境压力30 MPa。Hunting公司生产的水下湿插拔液压连接器具有金属密封和弹性体密封2种形式。Walther Präzision公司生产的HR系列水下湿插拔液压连接器工作压力10 000~14 503 psi,DD系列水下湿插拔液压连接器工作压力5 000 psi。



图8 4种水下液压连接器

Fig. 8 Four kinds of subsea hydraulic connector

国内湿插拔水下液压连接器需突破的难点:1)公母接头对接允许偏差小;2)低背压自密封能力低;3)浑浊液环境动密封能力差。

### 3.3 节流阀

水下节流阀位于水下采油树油嘴出口,用于控制水下井口的流量和压力。水下节流阀通过步进式液压驱动器操作阀杆组件上下运动,通过改变节流孔道的面积实现对流量的控制<sup>[24-25]</sup>。步进式液压驱动器采用棘轮往复运动结构,一次打压齿轮前进一齿牙,可精确控制阀门开度和流量。该驱动器配备液压驱动和水下机器人(remote operated vehicle, ROV)驱动接口,当选用ROV操作时,液压棘轮部件完全不参与传动,可大大提高液

动棘轮传动部件的使用寿命。其关键技术主要包括:高完整性密封技术、阀芯耐冲刷技术、精确步进式驱动器设计制造关键技术、回收工具设计制造关键技术、压力补偿技术等。目前性能优良,技术先进的水下节流阀主要有如图9所示美国Baker Hughes公司产品、英国Koso Kent Introl公司的75系列水下节流阀。

国内水下节流阀需要突破的难点:1)精确步进式传动机构设计及制造;2)阀芯耐冲刷结构设计及材料攻关;3)阀位指示传感器的设计及选型。

### 3.4 浅水水下生产系统的应用

按照“先易后难,先气后油,分步实施”的原则,浅水水下生产系统预计2023-2024年实现在我国

近海海域的工程示范应用。通过实际应用情况验证国产水下生产系统的可靠性,并持续完善和优化设

计,健全材料加工制造产业链,预计 2026-2028 年进入批量化应用,2030 年实现大规模应用。

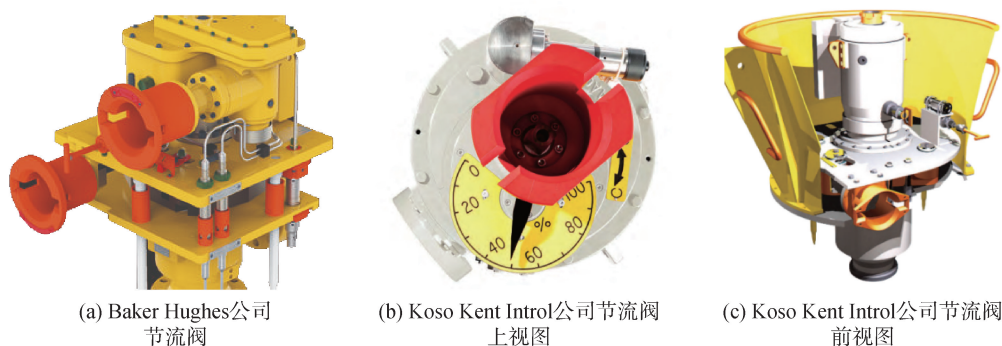


图 9 2 种节流阀

Fig. 9 Two kinds of choke valves

## 4 结论

1) 提出的国产浅水水下生产系统的总体设计方案,使浅水设备与深水相比在单体重量、作业方式、维护检修方面更加经济。

2) 提出满足受限区海域开发要求的环境友好型设计,满足了受限区开发的要求。

目前部分水下关键零部件仍依赖进口产品,存在交货期长、维修困难等问题制约着浅水油气田开发,需持续加强关键技术攻关,争取实现突破。

## 参考文献:

- [1] 张勇,李超. 国内油气对外依存度发展趋势[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(17): 124-126.  
ZHANG Yong, LI Chao. Development trend of domestic dependence on foreign oil and gas[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2023, 43(17): 124-126.
- [2] JAMALUDIN M A. Cost-effective application of subsea production system as field development concept in shallow water environment[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Society of Petroleum Engineers, Abu Dhabi, 2019.
- [3] HULSE E O, CAMPONOGARA E. Robust formulations for production optimization of satellite oil wells[J]. Engineering optimization, 2017, 49(5): 846-863.
- [4] HONG Cheng, ESTEFEN S F, WANG Yuxi, et al. Mixed-integer nonlinear programming model for layout design of subsea satellite well system in deep water oil field[J]. Automation in construction, 2021, 123: 103524.
- [5] ZHANG Yuzhe, TANG Wentao, DU Jialu. Development of subsea production system and its control system[C]//2017 4th International Conference on Information, Cybernetics and Computational Social Systems (ICCSS). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 117-122.
- [6] MOE S, MONSSON O S, ROKNE Y, et al. Electric controls technology: the role in future subsea systems[J]. 2018. DOI:10.4043/28562-MS.
- [7] SOMMER B, MAHLER C, STABLES G, et al. Competi-

tive system concepts for electrification of subsea structures in co-existence with electro-hydraulic control systems [C]//Offshore Technology Conference. Houston, 2022: 127-132.

- [8] 李志刚,贾鹏,王洪海,等. 水下生产系统发展现状和研究热点[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(5): 944-952.  
LI Zhigang, JIA Peng, WANG Honghai, et al. Development trend and active research areas of subsea production system [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(5): 944-952.
- [9] 董庆国. 浅海水下生产系统研究[J]. 石化技术, 2019, 26(4): 189.  
DONG Qingguo. Research on underwater production system in shallow sea [J]. Petrochemical industry technology, 2019, 26(4): 189.
- [10] 率鹏. 水下生产系统在浅水边际油气田的应用研究[J]. 石油和化工设备, 2019, 22(4): 67-69.  
SHUAI Peng. Study on application of subsea production system in shallow water marginal offshore oil & gas field development[J]. Petro & chemical equipment, 2019, 22(4): 67-69.
- [11] 吴露,安维峥. 水下生产控制系统比选及分析[J]. 石化技术, 2018, 25(9): 17-19.  
WU Lu, AN Weizheng. Comparison and analysis of subsea production control system[J]. Petrochemical industry technology, 2018, 25(9): 17-19.
- [12] ZHANG Yuzhe, TANG Wentao, DU Jialu. Development of subsea production system and its control system[C]//2017 4th International Conference on Information, Cybernetics and Computational Social Systems (ICCSS). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 117-122.
- [13] MAXWELL J P. Subsea production control systems[M]. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering. Hoboken: John Wiley and Sons, 2018: 1-12.
- [14] 安维峥,孙钦,魏娟,等. 水下电液复合控制系统方向控制阀技术现状[J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50(1): 1-9, 43.  
AN Weizheng, SUN Qin, WEI Juan, et al. Technical status of directional control valves for subsea Electro-Hydraulic control system[J]. Control and instruments in

- chemical industry, 2023, 50(1): 1-9, 43.
- [15] 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.  
HU Xuefeng, FENG Yansong. Composition and analysis condition of electro-hydraulic compound control system [J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(S1): 189-199.
- [16] WANG Liquan, WANG Xiangyu, LIZHANG Hanyi, et al. Design and reliability analysis of the electrical control system of the subsea control module [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part I: journal of systems and control engineering, 2019, 233(6): 720-733.
- [17] YUE Y L, ZUO X, WANG L J. Reliability analysis of hydraulic directional control valve installed in subsea control module [C]//Proceedings of ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013: 343-347.
- [18] International Standard ISO 13628-1, Petroleum and natural gas industries-Design and operation of subsea production systems-Part 1: General requirements and recommendations. [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2010.
- [19] 孙雪梅, 翁强, 张大为, 等. 压入式桩基础水下防渔网保护罩的研究与应用[J]. 石油和化工设备, 2020, 23(3): 45-47.  
SUN Xuemei, WENG Qiang, ZHANG Dawei, et al. Application and research of subsea pressed pile anti-fishing protection structure [J]. Petro & chemical equipment, 2020, 23(3): 45-47.
- [20] 朱春丽, 李书兆, 沈晓鹏, 等. 撞击载荷作用下水下沉箱防护设施损伤分析[J]. 海洋工程, 2021, 39(6): 136-142.  
ZHU Chunli, LI Shuzhao, SHEN Xiaopeng, et al. Damage analysis on impact of caisson structure for subsea protection [J]. The ocean engineering, 2021, 39(6): 136-142.
- [21] PLANT C. High-voltage subsea connectors: enabling innovative subsea power distribution solutions [C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference 2020. OTC, 2020: 178-213.
- [22] WYATT R. Novelty in the design of low-voltage subsea wet-mate connectors, demonstrating enhanced electrical performance and cost reduction [C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, 2022: 213-256.
- [23] WANG Hao, CHEN Jiawang, ZHOU Hang, et al. Research on novel multi-way hydraulic quick connector for underwater production system [J]. Marine technology society journal, 2021, 55(6): 129-138.
- [24] GHARAIBAH E, ZHANG Y. Flow assurance aspects and optimization of subsea choke valve Sand management and erosion [C]//Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, 2015.
- [25] TATTERSALL S. Choke valve technology in subsea environments [J]. Measurement and control, 2016, 49(3): 104-108.

### 本文引用格式:

孟凡然, 张重德, 曹永, 等. 浅水受限区水下油气田开发方案[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4): 779-785.

MENG Fanran, ZHANG Chongde, CAO Yong, et al. Development of underwater oil and gas fields in restricted shallow waters [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 779-785.