

海上石油开发工程的“明星”——FPSO

赵耕贤

(中国船舶集工业第七〇八研究所)

刘振国

(渤海石油采油公司)

摘 要

在开发和利用海洋油气资源的活动中,各种海上油气工程装备无疑是市场关注的焦点。近 10 年来,浮式生产已成为当今海上石油开发的主流方式。FPSO 是浮式生产系统中的关键设施,是海上石油开发工程装备中最耀眼的“明星”。FPSO 是一座“海上油气加工厂”,具有高风险、高技术、高附加值、高投入、高回报的综合性海洋工程特点。它相对于海上生产平台而言,具有抗风浪能力强、可长期系泊、储/卸油能力大、投资低、见效快及可以转移、重复使用等优点,特别适合于远离海岸的中、深海及边际油田的开发。

本文旨在就 FPSO 的市场、特点、相关系统(包括特殊系统、工艺系统)及设计准则等方面作一阐述。

关 键 词: FPSO; 浮式生产系统; 设计准则

1 前 言

“能源战略”倍受人们关注。美国目前的 10.5 万亿美元 GDP(国内生产总值)是建立在能源基础上的:93%的能源来自石油、天然气、煤炭和核电,其中石油占 40%,天然气占 22%^[1]。自 1993 年以来,我国已成为一个石油净进口国,石油净进口量呈逐年上升的趋势,在过去 10 年增加了 7 倍^[2],2003 年我国 1~10 月石油净进口量达到了 8627 万吨,占石油需求量约为 38%左右^[3]。国际能源机构《石油市场报告》表明:2004 年我国石油净进口总量预计达到 1.2 亿吨。20 年后,我国原油进口量将达 50%^[1]。从国际惯例看,一个国家石油需求量 50%以上能够自给就是安全的。所以,“石油安全”引起了我国政府的高度关注,着力加强石油储备的建设。

在海洋中蕴藏着丰富的油气资源,据统计海底石油储量约为 1400~2000 亿吨,占世界石油总储量的 30%~50%。因此,在能源消耗与日俱增的今天,对海底石油的钻探、开发和生产有着极其重要的战略意义。

在开发和利用海洋油气资源的活动中,各种海上油气工程装备无疑是市场关注的焦点。10 多年来,浮式生产储油船(Floating Production Storage and Offshore 简称 FPSO)是一种特殊类型的海上油气工程装置,是浮式生产系统中的关键设施。FPSO 是一座“海上油气加工厂”,具有高风险、高技术、高附加值、高投入、高回报的综合性海洋工程特点。它相对于海上生产平台而言,具有抗风浪能力强、可长期系泊、储/卸油能力大、投资低、见效快及可以转移、重复使用等优点,在海上油气开发中被广泛应用,已成为海上石油开发工程装备中最耀眼的“明星”。

本文旨在就 FPSO 的市场、特点、相关系统(包括特殊系统、工艺系统)及设计准则等方面作一阐述。

2 FPSO 国内外市场

2.1 FPSO 国外市场

1977 年~1985 年为发展初期, 1977 年, 壳牌石油公司开始用 1 艘 59000 吨载重量旧油船改装 FPSO, 在地中海卡斯特利翁油田作业, 成为世界首例。然而, 这一时期海洋油气开采的重点只集中在大型高产油气田上, 加上 FPSO 的配套技术水平有限, 因此早期的 FPSO 只属辅助性的装置, 工作海域也只以海况较好的地中海、东南亚和澳大利亚等。

1986 年~1994 年期间, FPSO 在海上油气开发中的优点, 日益显露, 地位得到确立, 并被广泛应用, 1993 年西班牙阿斯塔诺船厂为 Kerr McGee 公司北海 Greyhen 油田建造的 FPSO 是国外最早新设计的 FPSO。1998 年底, 法国订购了世界上最大的一座 FPSO, 载重量达到 34.3 万吨。2003 年 BP 公司在韩国建造了一艘 30 万吨载重的 FPSO, 已用于西非安哥拉的海上油气田作业。

1995 年以后至今, 随着海上油气开发从大陆架地区向深海转移, FPSO 的工作海域也在不断拓展, 并得到了进一步的发展, 广泛应用于北海、东南亚、中国海、西非; 在巴西、澳大利亚、地中海一带也有使用; 加拿大海域第一艘 FPSO 在 2003 年已投产; 美国也已通过相应法律, 允许墨西哥湾的海上油气开发可以使用 FPSO。

特别是 2002 年以后, 海上油气开发又在向 LPGFPSO、LNGFPSO、LNGFSRU、FPDSO 等形式发展。

据《Offshore》统计, 截止 2003 年 8 月全世界投入运行和在建的 FPSO 为 119 艘。从现有的 119 艘 FPSO 分析: 旧油船改装 65 艘, 占总数 54.6%; 新建 53 艘, 占 44.5%; 1 艘不详。从现有 119 艘 FPSO 的 DWT 来看, 5 万吨以下有 12 艘; 5~10 万吨有 21 艘; 10~15 万吨有 38 艘; 15~20 万吨有 11 艘; 20~25 万吨有 3 艘; 25 万吨以上有 24 艘; 另有 10 艘吨位不详。其中 20 万吨以上超大型 FPSO 占 22.7%。据不完全统计(截止 2003 年 9 月底), 近年来世界船厂共接获 FPSO 订单 11 艘, 20 万吨以上的就有 4 艘, 占 45%(见表 1)。

表 1 FPSO 订单情况(截止 2003 年 9 月底)

No.	业 主	艘数	吨 位(DWT)	造 船 厂	交船期
1	Shell Group	1	313,300	韩国 Samsung	2003.9
2	CNOOC	1	150,000	中国大连新厂	2004.3
3	Total Fina Elf	1	130,000	西班牙伊萨	2003.1
4	CNOOC	1	150,000	中国外高桥	2004.3
5	印尼 Conoca	1	210,000	中国大连新厂	2003.7
6	Modec Inc	1	150,000	韩国三星	2003.10
7	BP Amoco PLC	1	350,000	韩国大宇	2004.3
8	Chevron	1	90,000	日本石川岛播磨	2004.4
9	Exxon Mobil Corp.	1	368,000	韩国现代	2004.6
10	Husky Energy Inc	1	132,370	韩国三星	2005.1
11	比利时埃克斯玛尔公司	1		西班牙费内船厂	2003.1

根据美国《Quest Offshore Resources Inc.》的分析结果, 2001~2007 年全世界投入的海洋油气开发项目将达到 434 个, 其中水深大于 500 米的深水项目占 48%, 水深大于 1200 米的深水项目达 22%,

浮式生产系统的项目为 209 个。据一些机构预测，考虑到这些油田生产的需求，今后 5 年，约有 20 艘 FPSO 正在或计划建造（新建比例增加，吨位呈大型化发展，扩大至 30 万吨级超大型 FPSO）。从长远来看，FPSO 的工作海域也不断地向深海转移。

2.2 FPSO 国内市场

在国内，中国海洋石油总公司在 1986 年由法国道达尔公司设计、新加坡胜宝旺船厂改装 1 艘 17 万吨载重量、10 年船龄的油船成 FPSO（“南海希望”号），在我国北部湾围洲 10-3 油田作业，是我国海上油气开发应用 FPSO 的开始。20 世纪的 90 年代，又有“南海发现”号、“南海开拓”号、“南海胜利”号和“Nevoid Minim”号 4 艘 FPSO 在南海的惠州油田、西江油田、流花油田和陆丰油田作业。

我国不仅有旧船改装 FPSO，而且根据 ODP 报告，比国外早 4~5 年研制了新的 FPSO。20 世纪 80 年代，七〇八所为 JCODC 经营的渤中 28-1 油田设计“渤海友谊”号 FPSO（沪东造船厂建造）在 1989 年 4 月正式投产作业，是我国 FPSO 研制“零”的突破。此后经历了从小吨位到大吨位（15 万吨级）、多种单点系泊系统（软钢臂式、转塔式）、由横向输油转向纵向输油、水深从 24 m~117 m、从海况从良好（渤海湾）到海况恶劣（南海强台风海区）的发展历程。至今已有“渤海长青”号、“渤海明珠”号、“渤海世纪”号、“海洋石油 112”号、“海洋石油 113”号、“南海奋进”号、“海洋石油 111”号在我国渤海和南海的油田作业。其中“南海奋进”号和“海洋石油 111”号是 15 万吨级、内转塔式、不解脱、在强台风海域服务的 FPSO。

中国海洋石油总公司是我国最有国际竞争力的石油公司，目前已拥有 13 艘 FPSO，其中有 8 艘 FPSO 是由国内设计与建造（见表 2）。

表 2 国内设计建造的 FPSO

No.	船 名	油 田	系泊系统	载重量(吨)	水深(m)
1	“渤海友谊”号	渤中 28-1 油田	软钢臂式(单点)	52000	浅海
2	“渤海长青”号	渤中 34-2 油田	软钢臂式(单点)	52000	浅海
3	“渤海明珠”号	绥中 36-1 油田	软钢臂式(单点)	58000	浅海
4	“渤海世纪”号	秦皇岛 32-6 油田	软钢臂式(单点)	160000	浅海
5	“南海奋进”号	文昌 13-1/13-2 油田	内转塔式(单点)	150000	~117m
6	“海洋石油 111”号	番禺 4-2/5-1 油田	内转塔式(单点)	150000	~120m
7	“海洋石油 112”号	曹妃甸 11-1/11-2 油田	软钢臂式(单点)	160000	浅海
8	“海洋石油 113”号	渤中 25-1 油田	软钢臂式(单点)	160000	浅海

据报道：中国海洋石油总公司与美国康菲（Conocophillips）石油公司合作，共同开发蓬莱 19-3 油田，计划采用超大型 30 万吨级的 FPSO，在 2008 年 9 月投产。2004~2007 年中国海洋石油总公司还准备投入 2 艘大型 FPSO，开发我国南海的新文昌油气田和西江油气田。此外，开发南中国海的海上油气，也可能采用 20 万吨以上级超大型 FPSO。

综上所述，从国内外海上油气开发来看，FPSO 有着非常广阔的市场需求。

3 FPSO 的特点

3.1 FPSO 的工程特点

人们常将载重量 10~20 万吨的 FPSO，称为大型 FPSO。载重量超过 20 万吨以上、在 30 万吨左右的 FPSO，称为超大型 FPSO。FPSO 的概念最早提出于 1974 年。它不是“船”，但利用了“船”的理念和形状。这种外型类似油船的海上油气工程装置一般处在多个井口平台之间，是整个油田的中心。FPSO 通过特殊的系泊系统长期系泊在海上，能抗御百年一遇的环境条件。FPSO 的上甲板上设置模块平台，布置工艺、惰气、热站、计量、电站、变压器室和控制室等模块。在甲板上还密布各种生产设备和管路，与井口平台的管、线联接、并设有特殊的系泊系统、火炬塔等复杂设备，整船技术复杂，价格远远高出同吨位油船。

在油田正常生产中，FPSO 接收并处理由海底管线输送来的井口平台的原油，处理合格的原油储存在 FPSO 的货油舱内。FPSO 上甲板布置用于穿梭油船串靠或靠靠的系泊设备，在 FPSO 上甲板首（尾）部或舷侧布置特殊的卸油系统，将合格的原油外输给穿梭油船。并通过海底电缆向井口平台供电。图 1 是典型的 FPSO 首部设有一个内转塔式单点系泊系统。

FPSO 还能提供油田生产人员、修井人员及临时作业人员的居住，生活区布置在首部或尾部。生活区的顶部设有一个由空间钢架组成的直升机平台。上甲板尾部或首部设置有一定高度的火炬塔。不同的海上油田，有不同的油品特性，有不同的生产流程。为了适应海上油田的需要，就有不同的 FPSO 船体形状与布置。所以，FPSO 的基本特点是^[5]：

- 无推进动力
- 特殊海况
- 特殊的系泊系统
- 不进坞检修
- 特殊的卸油系统
- 超载复杂
- 系统复杂
- 安全性要求高

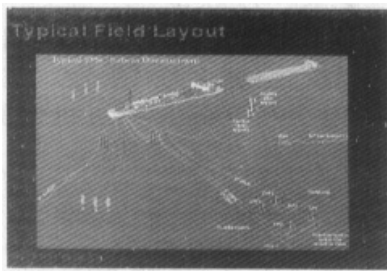


图 1 典型单点浮式生产系统

3.2 FPSO 管理上的特点

FPSO 的管理包括风险管理、营运管理、资产管理、生产操作管理、设备维修管理及停运状态管理等。目前，国际上 FPSO 的资产主要存在由管理公司、油公司或作业者管理的三种并存的管理模式。其中，由管理公司对 FPSO 实行舰队式管理的模式逐渐成为发展趋势。通过“湿租”、“干租”和资产参股、资产代管等方式为油公司或作业者提供全方位的服务。国际上比较知名的 FPSO 管理公司有摩纳哥的 SBM、荷兰的 BLUEWATER、加拿大的 TK/IUM 及挪威的 PROSAFE 等。他们在 FPSO 管理方面积累了丰富的经验。

国内 FPSO 的管理，在 1999 年以前都是由油公司或作业者自己管理。随着海上石油工业的发展，FPSO 国内市场已形成产业规模。近年来，多渠道出资建造、租赁服务、操作服务等方式已为油公司或作业者的所认可和接受。FPSO 产业链的形成，也为油公司、作业者、投资者、企业家及管理公司提供了多赢互惠的利益。所以，国内 FPSO 的管理也类似于国际市场，处于油公司、作业者和管理公司三种管理模式共存的阶段。

目前，国内的 13 艘 FPSO 主要集中在渤海和南海东部海域，随着超大型、深海等多种 FPSO 形式的出现，如何更科学、更有效地管理 FPSO 必须引起高度重视。

4 FPSO 的相关系统

FPSO 整船技术复杂。从 FPSO 构造上看, 主要包括: 特殊的系泊系统、复杂的载体系统、生产工艺系统、特殊的外输油系统, 涵盖了数十个子系统。

4.1 FPSO 特殊的系泊系统

FPSO 因系泊海域不同, 有浅水与深水之分, 系泊系统提供的系泊力也不同, 所以有各种系泊方式, 如图 2~图 7 所示。FPSO 的船首(尾)部或船舷设有一个特殊的系泊系统(可解脱/不可解脱), 是少数国际公司的垄断技术。它可分为单点和多点的形式。单点系泊系统有:

转塔式 (Submerged Turret, Buoy Turret),

单锚腿式 (Single Anchor),

浮筒转塔式 (Buoy Turret),

软钢臂式 (YOKE、CALM—Catenary Anchor Leg Mooring)。

硬悬钢臂式 (SALS—Single Anchor Leg Storage、SALM—Single Anchor Leg Mooring) 等形式。

国外的 FPSO 的研制已经从浅水走向深海, 最大吨位已达到 30 万吨超大型, 而且采用了单点系泊系统或多点系泊系统。



图 2 软钢臂式



图 3 硬钢臂式



图 4 21 万吨“TAZERKA”硬钢臂式

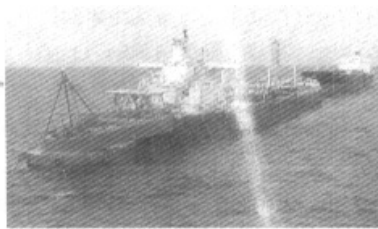


图 5 12.7 万吨“FPSO II”硬钢臂式



图 6 内转塔式 FPSO



图 7 “南海奋进”号 FPSO

4.2 FPSO 复杂的载体系统

FPSO 复杂的载体系统可以分为船体系统、公用系统、电站及电网系统、直升机平台系统、储油系统、安全救生及消防系统、监控系统、通信系统等。

(1) 船体系统是整个 FPSO 设计的关键、基础,是最重要、最基本的系统。如果设计失误,就会使 FPSO 的功能大大降低,甚至会使整个浮式生产系统失效,产生颠覆性的严重后果。FPSO 载(船)体系统又可以分为船体总布置、船体运动性能、特殊钢结构船体。

FPSO 的总布置、运动性能、船体与“船”相似,但其设计的理念有很大不同。FPSO 的总布置不仅应满足船级社规范、规则要求,便于设备布置与舱室调配,而且应满足操作的需要,油田能连续开采。除了具有 FPSO 的基本特点外,还应对生产模块、火炬塔、克令的布置作详细分析,做到安全、可靠、实用。特别是要围绕安全性的问题,要作重点考虑。

FPSO 的运动性能主要是适航性(纵荡、横荡、升沉、横摇、纵摇和摇首 6 种刚体运动幅值、周期和加速度—生产模块设备与结构物的设计参数,甲板上浪—避免模块平台上的设施遭受舷侧上浪的损坏),FPSO 适航性的研究主要是采用数值分析和模型试验。

FPSO 的特殊钢结构船体主要是结构形式和载荷,可参见文献[5]。

(2) FPSO 的公用系统很多。有些公用系统如燃料气系统、海水供应系统、压载水系统、燃油系统(包括重油系统、柴油系统和原油系统)、润滑油系统、压缩空气系统、HVAC 系统、开式排放系统等与常规船舶相同,但其特点是复杂些。除此之外,还有一些特殊的公用系统,如火炬系统、化学药剂注入系统、闭式排放系统等。

FPSO 火炬系统是油气生产的泄压系统,油气生产系统中分离出的气体,供燃料用后的剩余部分及系统泄漏出来的气体,经分液罐后烧掉;分出的液体送回污油舱。

FPSO 化学药剂注入系统是确保油气正常分离、减缓设备和管线的腐蚀而设置的。

FPSO 的闭式排放系统是生产模块上有些设备的接收系统(由于检修或某种原因需要排空)。

(3) 电站及电网系统

FPSO 的电站按其用途可分为主电站、备用电站和应急电站三大类。

FPSO 主电站是海上油气田的动力心脏,电站容量大(不但给 FPSO 自身供电,还要给井口平台供电)。主电站一般设在 FPSO 模块甲板上或机舱内。不同的油气田,由于产能规模、地质条件、开采方式、自然环境、运行要求和维护条件等的不同,FPSO 的主电站可以有不同的方案。FPSO 的主电站原动机,可以采用蒸汽透平、燃气透平、柴油机、天然气发动机以及原油发动机等。原动机选型应综合分析机组性能、投资成本、燃料气源情况、环境条件、现场安装和业主的特殊要求等。

FPSO 主电站机型确定后,应根据电站运行工况确定发电机组的容量,配置配电系统量。

(4) FPSO 的储油系统主要是货油系统、货油加热系统、货油注入系统、扫舱系统、洗舱系统、惰气系统、透气系统等设施,与常规船舶的基本相同。

(5) FPSO 的安全救生及消防系统应满足 SOLAS 的要求。

(6) FPSO 监控系统远比常规船舶复杂,主要有船用控制和中央控制两大控制系统。船用控制系统设在机舱控制室,用于对辅助设备的监测和控制。中央控制系统设在中央控制室,对全油田生产过程和人员设备安全进行监控。中央控制系统又有过程控制和安全监控两系统组成,过程控制系统用于对生产过程进行监控;安全监控系统用于对 FPSO 及井口平台的人员设备安全进行监控,它包括紧急关断(ESD)系统和火气(F&G)监控系统。

(7) FPSO 的通信系统是确保油田生产指挥、调度、生活管理及人员生命安全不可缺少的手段。

以 FPSO 为中心,使用无线通信和有线通信设施,完成 FPSO 内部通信和对船、对空、对各井口平台、对陆上和应急通信。

4.3 生产工艺系统

FPSO 的生产工艺系统分为原油处理系统、含油水处理系统、火炬塔系统。生产工艺系统对原油和含油水处理必须达到一定标准。FPSO 一般可设一路/两路相同的油、气、水分离处理系统。以便灵活切换系统。生产工艺设施布置的基本原则是:

*符合安全及规范 *保证工艺流程顺畅 *布置逃生路线 *操作方便和具有维修空间。

参考文献[5]列出了 FPSO 典型的生产工艺系统。它是将来自井口平台的原油经海底管线、单点输至 FPSO 原油处理系统的一级分离器,分离出的大部分的气体供发电用,剩余部分进入火炬系统放空烧掉;分离出的含油水进入含油水处理系统(图中为三级处理:沉降舱除油→水力旋流器→撇油排放罐除油);分离出的油进入二级分离器。由二级分离器分出的气体,部分利用,剩余部分放空烧掉。合格的原油进入油舱储存;不合格的原油送入回收油舱,再次返回一级分离器进行处理。

4.4 FPSO 特殊的外输油系统

穿梭油船一般串靠或旁靠在 FPSO。所以,从布置位置上 FPSO 可分为首(尾)部纵向或船舷横向的外输油系统。从形式又可以分为漂浮软管式(简易式、改进式)、卷筒式、滑道式和旁靠输油系统,见图 8~图 10。FPSO 外输油系统中的软管卷车、输油漂浮软管、万向接头、液压快速接头是少数国际公司的垄断技术。快速接头是少数国际公司的垄断技术。如下图 8 至 10 为 3 种外输形式。



图 8 纵向滑道式的外输系统



图 9 纵向漂浮软管式外输系统



图 10 纵向卷筒式的外输系统

5 设计准则

FPSO 不同于常规油船,除了要遵循船级社的“船舶建造入级规范”、“移动式海上平台规范”、“浮式生产储油船建造与入级规范”、国际海事组织(IMO)的 MARPOL 和 SOLAS 公约、国际海上石油合作论坛(OCIMF)的要求以外,还要涉及下列协会的许多特殊的技术标准^[7]:石油合作论坛(OCIMF)的要求以外,还要涉及下列协会的许多特殊的技术标准^[5]:

- | | |
|-------------------|-------------------|
| ◆ 美国石油工业标准(API) | ◆ 美国机械工程师协会(ASME) |
| ◆ 美国国家工业标准(ANSI) | ◆ 美国材料试验协会(ASTM) |
| ◆ 美国焊接协会(AWS) | ◆ 国际电气工程师协会(IEEE) |
| ◆ 国际电工委员会(IEC) | ◆ 美国测试设备协会(ISA) |
| ◆ 国际工程师防腐协会(NACE) | ◆ 国际电气制造协会(NEMA) |

◆ 国际防火协会 (NA)

◆ 国际标准化组织 (ISO)

其中涉及 API 的标准就有 38 份之多。

如果 FPSO 在某个国家所属的海域中进行作业,还必须满足该国行政部门的强制性规定。如在挪威北海的 FPSO 还必须满足挪威石油局 (NPD Norwegian Petroleum Directorate) 规范,主要是防止污染、保护人员和工作环境、排放 CO₂ 收税等的规定。挪威石油工业标准 (NORSOK — The competitive standing of the Norwegian offshore sector), NORSOK C-001, 生活区域的框架设计。如用在没有规定的国际海域中进行作业,则船级社应提供一个能被政府部门、保险公司和业主所接受的独立标准。其中 MARPOL 和 SOLAS 的适用范围,可由国家行政部门和船旗国决定,但业主在早期阶段与他们讨论是十分重要的。

6 FPSO 设计网络

对于 FPSO 承包商来说,除了掌握上述设计准则外,还应注意协调整个工程各部门之间的相互关系^[5] (见图 11)。

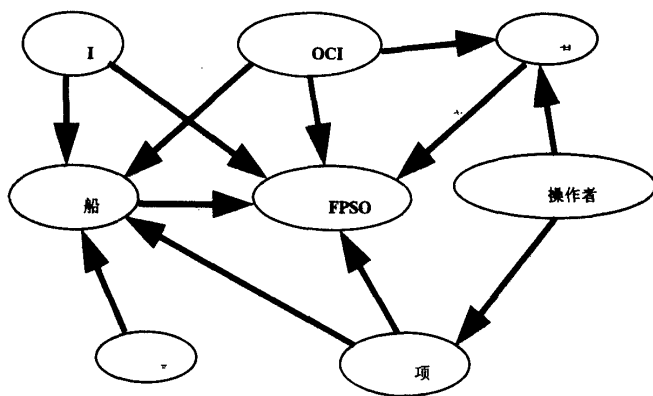


图 11

7 结 语

综上所述, FPSO 已成为当今海上油气开发浮式生产系统中最耀眼的“明星”,有着非常广阔的市场需求。值得指出的是:不同海况、不同油田、不同系泊系统, FPSO 差异相当大。应在国内已研制了近十艘 FPSO 的基础上,加强对大型及深水超大型 FPSO 的研制。在 FPSO 的设计理念、规范标准、单项关键技术等方面,缩短与国外有较大差距。以实现海洋石油工业的腾飞和将我国建成世界第一造船大国的宏伟目标。

参 考 文 献

- 1 《国际石油经济》2003 年 7 月号。
- 2 《国际石油经济》2003 年 3 月号
- 3 《国际石油经济》2004 年 1 月号 Market Analysis, 国家统计局、国家海关总局署
- 4 《国际石油经济》2003 年 8 月号
- 5 赵耕贤《海上油田浮式生产储油船船型优化研究技术总结报告》2002 年 12 月

BIG STAR OF OFFSHORE OIL DEVELOPMENT ENGINEERING—FPSO

ZHAO Geng-xian LIU Zhen-guo
(MARIC) (Bohai Oil Production Company)

Abstract

It is no doubt that offshore facility is a key point for exploitation and utilization of offshore oil field. In recent 10 years, Floating Production System has regarded as a main approach to develop offshore oil and gas in the world. FPSO (Floating Production, Storage and Offshore), being the key facility of the floating production system, becomes the most dazzling big star. As an offshore factory for crude oil and gas process, FPSO has intergrated property of offshore engineering with high risk, high technique, high value, high investment and high return owing to its outstanding advantages compared with production platforms, such as stronger resistance of wind and wave loads, bigger storage capacity, lower investment, taking effect more rapidly, easier transfer and reuse. Therefore, it is especially suitable for oil fields in blue water and marginal field.

The peper introduces FPSO market, characteristics, system including mooring, marine, process system offloadig systems, as well as design principles etc.

Keywords: FPSO; Floating Production System; Design Principlesetc

作 者 简 介

赵耕贤 1941 年生, 男, 研究员, 上海市高级造船专家。1964 年上海交通大学船舶制造系毕业, 长期从事船舶及海洋工程设计。

刘振国 1954 年生, 男, 高级工程师。1980 年天津大学海洋工程系毕业, 多年从事海上设施管理。