

# 我国浮式生产储油装置的研制与开发\*

周守为<sup>1</sup> 曾恒一<sup>1</sup> 范 模<sup>2</sup>

(1. 中国海洋石油总公司; 2. 中海石油研究中心)

**摘 要** 我国自主研制了 8 艘浮式生产储油装置(FPSO)。依托这 8 艘 FPSO,成功开发了 10 个海上油田,其中 7 个为年产油  $100 \times 10^4 \text{m}^3$  以上的油田。在 FPSO 研制过程中,共申请了 12 项专利,制定了多项技术标准。FPSO 的研制促进了相关学科的发展与人才培养,FPSO 已成为海洋石油开发的战略性技术。目前中国海油 3 900 多万吨油当量的年产量中,75% 的产能依靠 FPSO 支持。在研制 FPSO 过程中,已掌握了 FPSO 设计、建造的许多关键技术,并取得了多单元复杂系统总体优化设计技术、大型浮体浅水效应技术\*\*、抗冰设计方法和抗强台风永久性系泊系统设计技术等 4 项核心技术的重大突破。这些关键技术与核心技术的掌握和突破,以及它们的成功应用,使 FPSO 在我国海洋石油工业发展进程中起到了关键作用。我国已成为世界上使用 FPSO 最多的国家之一,也是设计与建造 FPSO 最多的国家之一。我国的 FPSO 总体技术已达到当今国际先进水平。

**关键词** FPSO 研制 总体技术 国际先进技术

浮式生产储油装置(Floating Production, Storage and Offloading system,简称 FPSO)是集油气处理、储油与卸油、发电、控制、生活功能为一体的海上油气处理装置。FPSO 主要包括船舶系统(这里主要指储油与卸油系统)、上部油气处理系统和单点系泊系统等三大系统,是石油与船舶等工业的集成装置。FPSO 既是技术密集又是资金密集的开发海洋石油的关键设施,FPSO 的设计、建造与安装技术充分反映一个国家的工业制造水平和海洋石油开发的综合能力。

中国海油目前共建成 45 个油气田,油气产量已从 1982 年年产原油  $9 \times 10^4 \text{t}$  发展到 2005 年年产原油  $3 197 \times 10^4 \text{t}$ 、天然气  $70.29 \times 10^8 \text{m}^3$ ,合计产量 3 900 多万吨油当量,其中 75% 的油气产能依靠 FPSO 支持。中国海油目前共使用了 14 艘 FPSO,其中国内 13 艘、国外 1 艘(印尼,海洋石油 114 号)。国内 13 艘 FPSO 分布于渤海和南海,作业海域水深从 10 多 m 到 330 m 不等,FPSO 的载重吨位从 5 万吨到 25 万吨,载重吨位合计已达到 170 多万吨。

自 20 世纪 80 年代中期开始研发 FPSO 以来,

我们在引进、消化、吸收世界先进技术的基础上,成功地研制了以“渤海友谊号”为代表的 8 艘 FPSO (见第 77 页附图 1),利用它们开发了 10 个海上油田,其中 7 个为年产油 100 万  $\text{m}^3$  以上的大型油田(表 1),并取得了大量技术创新成果和科研生产经验;尤其在多单元复杂系统总体优化设计技术、大型浮体浅水效应技术、抗冰设计方法和抗强台风设计技术方面取得了创新性成果,所研发的 FPSO 总体技术已达到当今国际先进水平。

## 1 研制背景

FPSO 问世于 20 世纪 70 年代中期,大规模发展于 90 年代,目前全世界已有近百艘 FPSO 服役,它们主要分布在北海、巴西沿海、西非沿海、东南亚和中国的渤海、南海。FPSO 是由油气处理与储运、海洋工程与船舶工程等高新技术集成的大型海上浮式油气处理设施,是海上油气集输的主要手段,尤其对离岸较远和深海海域的油气田,更是开发生产的关键设施。FPSO 由于具有海域适应性强、经济性好、可靠性高和可重复利用等特点,已被国际石油工

\* 获 2004 年度中国海洋石油总公司科技进步特等奖;获 2005 年度国家科学技术进步二等奖。

\*\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)经费资助项目“浅水超大型浮式生产储油系统关键技术”(2002 AA 602011)。

第一作者简介:周守为,男,高级工程师,1982 年毕业于西南石油学院采油工程专业,现任中国海洋石油总公司副总经理。地址:北京市东城区东直门外小街 6 号海油大厦(邮编:100027)。

表 1 8 艘新建 FPSO 投产使用统计资料<sup>1)</sup>

FPSO 名称	载重吨位 (万吨)	投产日期	使用油田名称	使用油田产能 ( $10^4 \text{m}^3/\text{a}$ )
渤海友谊号	5	1989 年 7 月	渤中 28-1 油田	43
		2004 年 7 月	渤南油气田	62
渤海长青号	5	1990 年 6 月	渤中 34-2/4 油田	40
渤海明珠号	5	1993 年 9 月	绥中 36-1 油田(I 期)	120
		2002 年 12 月	蓬莱 19-3 油田(I 期)	150
渤海世纪号	16	2001 年 10 月	秦皇岛 32-6 油田	414
南海奋进号	15	2002 年 7 月	文昌 13-1/13-2 油田	300
海洋石油 111 号	15	2003 年 7 月	番禺 4-2/5-1 油田	330
海洋石油 112 号	15	2004 年 8 月	曹妃甸 11-1/12-1 油田	385
海洋石油 113 号	16	2004 年 9 月	渤中 25-1 油田	339

业界广泛地用于海上油气开发,并得到大力发展。

海上油气开发及处理设施的最大风险是恶劣的海况条件。我国沿海海域的特点是:北有海冰海水浅,南有台风海水深。渤海辽东湾海域每年冰期长达 105~120 天,结冰面积几百  $\text{m}^2$  到几  $\text{km}^2$ ,冰厚 10~40 cm,而多个年产油在 100 万吨以上的油田又位于水深仅 10~40 m 的渤海海域。在南海海域,由于特殊的地理条件,强热带风暴、强对流灾害性天气和土台风(南海海域生成的热带气旋)一直影响着海上油气勘探开发的正常运行,据近年资料统计,受恶劣海况影响,南海一些油田每年要停产 25 天左右,海上钻井作业每年要停止 550 小时左右。

在我国近海已发现的油气田中,有很多是因可采储量小而不能单独开发的边际油气田,尤其是渤海的断块油气田;还有一些是稠油油田,而海上生产平台的面积极为有限,稠油开发更为困难。因此,经济有效地开发边际油田和稠油油田,研究最佳的开发方案,采用合适的工程方案和工程设施是十分必要的。

针对我国海域浅水、海冰、台风等恶劣海况,以及边际油田与稠油油田开发技术难度与经济效益等问题,自主研发符合我国海上油气田特点的 FPSO 已成为我国海洋石油工业的科技攻关重点。经过“九五”、“十五”期间的努力,我们不仅取得了重大科技成果,而且有效地开发了海上多个油气田。

## 2 重大技术创新

经过努力,走自主创新之路,我们攻克了一些船体功能和系统设计方面的世界难题。在中国船舶工

业集团第七〇八研究所、大连新船重工有限责任公司、上海外高桥造船有限公司、海洋石油工程股份有限公司和上海交通大学等单位的大力支持和帮助下,我们取得了在船体结构优化设计与分析技术、内转塔式单点系泊结构的高精度安装与焊接工艺、多用户和高清洁度的液压管系投油工艺技术、两大段船体高精度对接新工艺、大型油气处理模块制造与主甲板连接技术、FPSO 海上安装技术、FPSO 水动力特性分析与荷载预报等方面的创新技术成果,并实现了 FPSO 研制 4 项核心技术的重大突破。

### 2.1 多单元复杂系统总体优化设计技术

按照常规的 FPSO 工程项目管理模式,FPSO 上部油气处理设施和单点系泊装置的设计与建造执行海洋工程标准和要求,而 FPSO 下部船体的设计与建造执行船舶工程标准和要求,由于二者的工程设计标准和常规、习惯做法要求不同,在设计过程中难免造成工艺和公用等系统设施和系统相互重叠。在最近几艘 FPSO 的设计中,我们将整个 FPSO 作为一个单元(整体)来考虑,遵循资源共享、就近分配的原则,统一考虑设备(包括备用设备)、管线及电缆等布置方案,主要在工艺系统、公用系统、仪控系统和电气系统等方面进行了一体化设计。

总体优化设计技术突破了常规的 FPSO 设计理念,将油气生产系统和船体储油系统 2 个行业体系的分体设计改为了统一技术标准的一体化设计。该技术首先在“海洋石油 111 号”FPSO 上得到应用,一方面避免了系统重叠,使管线、电缆、阀门等用量平均节约 25%,相应的设备节省 50%,较好地实现了系统资源共享和优化配置,降低了 FPSO 工程投

1) 中国海洋石油有限公司. 百万吨级海上油田浮式生产储运系统研制与开发[R]. 2005.

资;另一方面实现了全船集中监控,提高了整个系统的安全性、可靠性和可维护性。

## 2.2 大型浮体浅水效应技术

本文中的“浅水”是一个相对概念,当水深与浮体吃水相当或接近(水深/吃水 $\leq 1.3$ )时,称该水深为“浅水”。研究发现:大型浮体在浅水漂浮状态下,随着水深与浮体吃水之比的进一步减小,其运动特性将发生较大变化,主要表现为平面漂移运动加大,垂向及摇摆运动减缓;当浮体吃水越接近水深时,浮体垂向及摇摆运动的减缓越明显。对这种物理现象,我们称之为“浅水效应”。在大量的水池模型试验及理论计算分析的基础上,在世界上首次揭示了大型浮体在浅水状态下的附加质量、阻尼、波频运动和慢漂运动等特殊现象,并将其用于预报大型浮体在浅水漂浮状态下的运动响应和荷载<sup>[1]</sup>。这一成果使浅水中浮体主尺度优化设计有了全新的概念。应用大型浮体浅水效应技术预测浮体的载重量,可使浮体装载能力提高 6%~9%,并可使船体总纵强度得到改善,钢材用量减少。该技术主要应用于:

(1) 浅水中浮体的吃水设计,浮体主尺度的优化,浮体装载能力的提高;

(2) 浅水海域系泊系统性能的优化;

(3) 工程船舶在浅水系泊作业状态下最小安全作业水深的预报。

渤中 25-1 油田“海洋石油 113 号”FPSO 采用了大型浮体浅水效应技术,使水深与吃水之比由必须大于 1.3(传统概念)降低到 1.15,提高该 FPSO 装载能力约 3 万吨,并缩短设计工期约 4 个月。

## 2.3 抗冰设计方法

全球范围油气田处于冰区海域的情况不多。我国渤海冬季结冰,重冰年时平整冰厚在 40 cm 以上。20 世纪 80 年代,我国在世界上首次尝试在冰区海域采用 FPSO 开发石油。冰力是 FPSO 的控制荷载,针对海冰对 FPSO 的破坏作用进行了大量的物理模拟和数字模拟,并先后在世界著名的荷兰瓦格宁根水池和德国 HSVA 冰试验水池进行了 FPSO 与单点系泊结构的模型试验研究,并使用德国 IMPaC 近海工程公司的冰对结构作用力方面的研究成果与软件,对试验研究结果进行了分析。由于风或潮流的作用,冰力对 FPSO 的作用不一定是沿着船体的纵方向,可能在斜向或横向上,这与常规抗冰型运输船舶设计时考虑的条件不同。因此,对 FPSO

船体抗冰能力的加强,主要考虑在两舷吃水变化部位和艏部,而艏部有单点系泊塔架,可对冰力起到消减作用。

在绥中 36-1 油田“渤海明珠号”FPSO 及单点系泊装置结构的校核中,FPSO 船体除需按规范<sup>[2]</sup>进行 B3 级以上的冰区加强外,其艏部和舯部舷侧还要进行适当加强。当 FPSO 在平整冰厚为 24 cm 的情况下作业时,一旦海流改变方向,可能导致舷侧受到海冰的冲击,单点系泊装置结构与 FPSO 支撑结构的应力会超过设计的承载能力,此时 FPSO 必须与单点系泊装置解脱。经过渤海 10 多年冬季冰期考验,事实证明我们所研制的抗冰型 FPSO 是成功的。目前,在渤海使用的抗冰型 FPSO 共有 6 套。我国是世界上在冰区使用 FPSO 进行油田开发最多的国家。

## 2.4 抗强台风永久性系泊系统设计技术

文昌 13-1/2 油田的“南海奋进号”FPSO 是国内设计建造的第一艘专门用于百年一遇台风环境不解脱的 FPSO。在研究设计中,我们开发了改善 FPSO 艏部线型、增设挡浪墙(以防止浪对生产设施的影响)、适当提高上部模块甲板层高等技术,有效地解决了在南海海域使用 FPSO 的特殊性和关键性技术问题,打破了传统船舶行业 4 种设计工况船体强度校核的惯例,而采用 34 种海洋工程设计工况船体强度校核标准,实现了 FPSO 在作业与检修共存状态下总强度分析的理念,成功地控制了 FPSO 在台风高发海况下的中垂弯矩荷载。由于我们的积极主张与推荐,挪威 APL 单点公司将单点系泊由最初传统的 1×8 布缆方案改为了 3×3 布缆方案,使系泊系统更为紧凑、水下软管及电缆布置净空间更加宽敞,在大大降低系泊系统造价的同时,将安全系数由 1.25 提高到 1.45。

“南海奋进号”FPSO 投产至今已成功经受了 7 次台风的考验。这是我们第一次经受较深水域环境考验的海洋工程项目,为今后走向更深水域积累了经验。

## 3 研制过程的关键技术

经过科技攻关和应用实践,我们在 FPSO 规划、设计、建造、操作等方面积累了丰富的经验,可根据不同类型油气田、不同环境条件、不同原油外输方式及操作要求等进行 FPSO 方案优化,已形成独具一

格的 FPSO 关键技术:

- (1) FPSO 的综合评价技术与功能设计技术;
- (2) 高效集成的优化设计技术;
- (3) 大型电、热站的联供与输配技术;
- (4) 多系统、多危险源高度集中载体的集成中央控制系统设计技术;
- (5) 单点定位系泊系统新技术;
- (6) 大型模块制造与 FPSO 海上安装连接技术;
- (7) FPSO 水动力特性分析与荷载预报技术;
- (8) FPSO 结构优化设计与分析技术;
- (9) FPSO 建造的特殊技术与新工艺。

## 4 经济效益与社会效益

从 1989 年自主设计建造我国第一艘 FPSO“渤海友谊号”以来,我国海上已经有 8 艘自主建造的 FPSO 投入生产,我国已成为拥有新建造 FPSO 数量最多的国家之一。到目前为止,这 8 艘 FPSO 已为或正在为 10 个油田提供生产服务。依托这 8 艘 FPSO 开发生产的油田,其累计产量将达到  $12\ 434 \times 10^4 \text{t}$ 。按油田投资比例折算,8 艘 FPSO 的经济收入将达到 600 亿元。

FPSO 的自主建造有利地促进了我国工业的发展,对冶金、造船、机电制造业的技术进步和整体技术水平的提高起到了带动作用。据统计,建造 8 艘 FPSO 的总投资约 70 亿元,其中国内采办、建造部分约为 45 亿元,上部模块的国内设备采办合同数约占总设备采办合同数的 50%。8 艘 FPSO 的建造大大促进了我国相关传统产业的高标准、国际化进程,促进了这些产业的跨越式发展,打造了中国建造 FPSO 的品牌。

在 FPSO 研制过程中,共申请专利 12 项,其中发明专利 9 项(已批准 3 项),实用新型专利 3 项(已全部批准);制定了有关技术标准与规范,如海洋工程行业《浮式生产储油装置(FPSO)安全规划》、《浮式生产储油装置(FPSO)检测维修技术标准》,以及中国船级社《海上浮式装置入级与建造规范》。8 艘 FPSO 的设计、建造、安装与使用,还带动了我国相关大学与科研机构的学术研究与发展,为我国培养科技人才创造了良好基础;而相关学科的发展又为国内外海洋油气资源开发提供了进一步的技术支持,这些都将对大规模开发我国南海深海能源起到重要的促进作用。

## 5 成果与展望

FPSO 已成为我国海上油气田开发的关键设施,目前我国近海共有 13 艘 FPSO 在服役,我国已成为世界上使用 FPSO 最多的国家之一,同时也是 FPSO 设计与建造的大国之一,我们的 FPSO 总体技术已达到当今国际先进水平。表 2 为 2004 年美国《Offshore》杂志统计的世界上使用 FPSO 较多国家有关数据<sup>[3]</sup>。

表 2 使用 FPSO 较多国家有关数据统计表 (艘)

国家	服役总数	新建	改造
英国	13	9	4
中国	13	8	5(租用 1 艘)
巴西	12	1	11
挪威	8	8	
澳大利亚	8	3	5
尼日利亚	8	1	7
安哥拉	7	4	3
越南	5	1	4
印度尼西亚	4	1	3
赤道几内亚	3		3
马来西亚	3		3
突尼斯	1		1
加拿大	1	1	
刚果	1		1

到 2008 年,我国还将有 1 艘 30 万吨级和 2 艘 10 万吨级 FPSO 投入使用。随着小油田与边际油田开发的需求,我们将研发多种多样、全新概念的 FPSO,如小吨位紧凑型 FPSO,多点系泊八角型与圆型 FPSO 等。为适应我国南海深水油气资源开发的需要,以生产液化石油气(FLPG)、液化天然气(FLNG),以及原油与液化天然气(FONG)为特点的各类海上浮式生产储油(气)装置也将应运而生。

FPSO 是技术成熟且安全可靠的海上油气处理关键设施,随着深水油气资源开发利用的发展,FPSO 的优越性将会更加显现。FPSO 关键技术已成为目前海上油气资源开发的战略性技术。

### 参 考 文 献

- [1] 范模. 浮式生产储油装置浅水效应与 Y 型舷侧结构的研究与应用[J]. 中国海上油气, 2004, 16(5): 289-293.
- [2] 中国船级社. 钢质海船入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] NUTTER T, ALBAUGH E K. 2004 worldwide survey of floating production storage and offloading (FPSO) units[J]. Offshore, 2004, 64(9), 65.

收稿日期: 2006-01-17 改回日期: 2006-02-10

(编辑: 张 敏 张金棣)



附图 1 我国自主研制的 8 艘 FPSO

## Floating production, storage and offloading system researched and developed in China

Zhou Shouwei<sup>1</sup> Zeng Hengyi<sup>1</sup> Fan Mo<sup>2</sup>

(1. *China National Offshore Oil Corp., Beijing, 100027;*

2. *CNOOC Research Center, Beijing, 100027*)

**Abstract:** There are eight floating production, storage and offloading systems (FPSO) researched and developed in China. Ten offshore oilfields have been developed successfully with these FPSO systems, including seven offshore oilfields with annual oil production of more than a million cubic meters. FPSO technology, represented by twelve patents, well established technical standards, and a group of seasoned FPSO technical personnel, is playing a strategic role for CNOOC's offshore oilfield development. At present, 75% of the CNOOC's annual oil equivalent of 39 millions cubic meters flows through FPSO's. As a result of the above mentioned research and development work,

we have a good grasp of the key technology associated with FPSO's design and construction, and have made innovations in the following four core areas: ①the integrated system design and optimization for FPSO; ②shallow water effect for large floating body; ③ice-resisting design methodology for FPSO hull and SPM; ④design methodology of permanent mooring system and FPSO hull in typhoon infested area. Due to the successful application of these technologies, FPSO is playing a key role in the development of China's offshore oil and gas fields. China has become one of those countries which design, construct and use FPSO most widely for offshore oil field development. FPSO integral technology of China has reached the advanced technology level in the world.

**Key words:** FPSO; research and development; integral technology; advanced technology in the world

## 中国海油组织设计的浮式生产储油船“渤海友谊号”荣膺“中国十大名船”称号

我国首次开展的十大名船评选活动于2006年3月23日下午在北京人民大会堂揭晓,我国第一艘自行设计建造的浮式生产储油船(简称FPSO)“渤海友谊号”(所属单位:中国海洋石油总公司;设计单位:中国船舶工业集团公司第七〇八研究所;中海石油研究中心)荣膺“中国十大名船”称号。

“渤海友谊号”是集原油加工、海上油库、海上卸油终端、配套生产及生活等功能于一体的海洋石油开发的大型重要设施,它的建成实现了我国FPSO设计建造零的突破。现在我国已成为世界上拥有FPSO数量及新设计建造FPSO数量最多的国家,FPSO支撑着我国海洋石油70%的产能,并形成了一个新兴产业,带动了相关制造业的发展。我国FPSO技术已达到世界先进水平。“渤海友谊号”建造对世界FPSO技术的贡献在于开展了浮式装置与冰相互作用机理的研究,成功地解决了抗冰加强、冰区输油、应急解脱等关键技术,首次将FPSO用于有冰海域。

荣膺“中国十大名船”称号的还有:中国首艘自行设计建造的万吨级远洋船“东风号”,中国第一代导弹驱逐舰“济南舰”,中国首艘多功能大型远洋综合调查船“向阳红10号”,中国首艘按国际标准建造的出口船舶“长城号”,中国第一代弹道导弹核潜艇,中国新型常规潜艇,新型导弹驱逐舰“哈尔滨舰”,航天测控船“远望3号”,中国首艘三十万吨级超大型原油船“德尔瓦号”。

本次评选由中国国防科学技术工业委员会、交通部等14家单位共同主办,全国政协副主席、中国工程院院长徐匡迪,国防科工委主任张云川等向十大名船设计者、建造者颁奖。

(范模)