

浮式生产储油卸油装置单点系泊系统综述

谢铜辉, 杨料荃

(深圳海油工程水下技术有限公司, 广东 深圳 518067)

摘要 针对国内浮式生产储油卸油装置 FPSO 单点系泊系统进行了系统的综述。分别介绍了悬链式系泊系统 (CALM)、单锚腿系泊系统 (SALM)、塔式软刚臂系泊系统 (SYS)、外转塔式系泊系统 (ETM) 和内转塔式系泊系统 (ITM), 并展望了 FPSO 在我国深水海洋油气资源开发中的应用。

关键词 浮式生产储油卸油装置; 单点系泊系统; 软刚臂系泊系统; 内转塔系泊系统

中图分类号 TE952; U656.1+26

文献标志码 A

文章编号: 2095-7297(2014)03-0189-06

Review of Single-Point Mooring System of FPSO

XIE Jian-hui, YANG Liao-quan

(COOEC Subsea Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518067, China)

Abstract We summarize the single-point mooring systems of floating production storage and offloading system (FPSO). The review covers catenary anchor leg mooring system, single anchor leg mooring, soft yoke mooring system, external turret mooring system, and internal turret mooring system. In the end, the application prospects of FPSO for domestic deepwater oil and gas resources development are given.

Key words floating production storage and offloading system; single-point mooring system; soft yoke mooring system; internal turret mooring system

0 引言

浮式生产储油卸油装置 (FPSO) 的发展历史已有近 40 年。作为一种海上油气生产系统, 它集海上油气生产、储存和外输以及生活、动力于一体, 并通过系泊装置长期定位于固定海域, 适用于 20~2 000 m 不同水深及各种环境下的海况。与传统的固定导管架平台加海底管道的开采形式相比, FPSO 具有投资低、见效快、风险小、可重复使用等特点。在远离海岸的中、深海及边际油田的开发中, 相较于传统方式, FPSO 更具有不可比拟的优势。

FPSO 在从事海上油气开采作业的过程中, 首先便需要具备海域长期定位与克服一定海况这两种基本性能, 因此, FPSO 采用不同于常规船舶锚泊设备的系泊系统。作为 FPSO 设计中最为核心的技术之一, 系泊系统的历史其实较 FPSO 更为久远。以系泊船舶是否具备风标效应区分, 系泊系统大致可分为多点系泊 (SMS) 与单点系泊 (SPM) 两大类。

其中 SMS 不具备风标效应, 多使用在海况较为平稳的海域, 如西非、印尼、巴西海域等。在这些海域, 波浪和风向一定, FPSO 顺波浪方向布置, 系泊索由船艏和船艉向西面八方展开并链接至海底锚桩, 立管设置于船舷两侧, 如巴西“Cidade de Angra dos Reis MV22”号 FPSO, 采用 SOFEC 公司设计的 SMS 系泊系统, 作业水深达到 2 149 m^[1]。在台风、飓风多发, 海况复杂的海域, 例如南中国海, 像 FPSO 这种船舶型浮体, SMS 显然并不适合。因此, 单点系泊系统由于其在克服恶劣海况与对不同海域的包容性方面的优势, 成为我国海洋石油开发中 FPSO 的主要系泊方式。

在 SMS 系统中, 系泊系统与立管系统无论从布置形式还是功能上都相对独立, 而 SPM 系统则是集定位系泊和外输原油终端两种作用于一体, 与船舶点式连接, 系泊点同时完成船舶定位与油气输送两种功能, 并且在风、浪、流影响下, 船舶可绕系泊点做 360° 旋转。对于 FPSO 这种纵横向环境力相差很

收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 谢铜辉 (1987—), 男, 硕士, 主要从事水下结构物和单点锚系的研究。

大的船舶型海上装置,单点系泊显然具备更好的优越性。按照美国船级社(ABS)的分类,单点系泊系统共分为悬链式系泊系统(CALM)、单锚腿系泊系统(SALM)、塔式软刚臂系泊系统(SYS)和转塔式系泊系统(TM),其中转塔式系泊系统又可细分为外转塔式(ET)和内转塔式(IT)。本文对几种系统分别加以介绍。

1 悬链式系泊系统

CALM 最初是作为“海上加油站”设计投产的。它主要是作为固定码头的补充或替代设备,相对于

传统的固定式码头具有投资省、见效快等优点,被广泛用于原油装卸。CALM 是单点系泊中数量最多的一种,也是发展时间最久、最为成功的一种类型。

CALM 主要由浮筒、系泊锚链和输油系统组成。浮筒作为系泊主体浮于水面,并通过多根呈辐射状均布的悬链固定于海床,恢复力由悬链提供。FPSO 通过系泊缆系泊于浮筒转台,被约束在固定海域,转台可使 FPSO 绕浮筒做 360° 旋转,因此具备良好的风标效应。转台中心设有流体旋转头,旋转头向下连接水下软管和输油管汇,向上连接有漂浮软管并通向 FPSO,如图 1 所示。

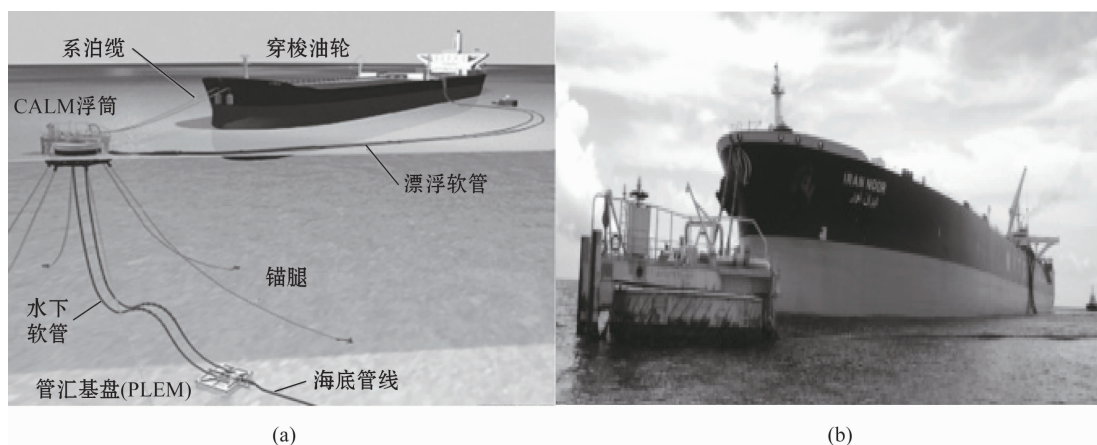


图1 悬链式系泊系统

Fig. 1 Catenary anchor leg mooring system

1992 年茂名石化公司引进了我国首个海上悬浮式 25 万吨级 CALM 单点泊位码头,现已升级至 30 万吨级别,图 1(b)是该 CALM 的现场照片。进口原油通过单点管汇卸船上岸较从湛江固定码头上岸每吨可节省费用约 23 元,自投产以来已累计为企业节省原油运输成本 30 亿元^[2]。可见,作为固定码头的补充,CALM 单点系统具备良好的经济效益。另外在南海北部湾涠洲西南油田群,也有 CALM 系泊系统服务。涠洲 CALM 系泊系统设计能力为 6 万吨级,单点距涠洲终端处理厂 2.9 km。

CALM 单点系泊系统在码头、泊位和航道水深不足的近海海域有其突出的优势,但是随着水深的增大,则需要更长的悬链,也就意味着需要更大的浮筒。虽然可用重量更轻的钢缆代替锚链,但钢缆在吸收动载荷和使用寿命上不如锚链,因此限制了 CALM 的应用水深。目前在 100 m 以下水深的海域,CALM 多采用全锚链式悬链,而在大于 100 m 的中深海域,多采用钢缆锚链混合的悬链,以综合发挥其各自的优势。另外由于浮筒与 FPSO 通过系泊

缆连接,在环境载荷下二者的响应不同,因此,环境因素也限制了其适用海域。

2 单锚腿系泊系统

SALM 是一种构造简单紧凑的系泊系统,它包括三个部分:一是由基盘和桩基或吸力锚组成的海底锚固装置;二是由万向接头、锚链或杠件、系泊浮筒和系泊缆组成的系泊装置;三是由基础软管、旋转接头、水下软管和漂浮软管等组成的输油装置。其组成则是通过一根锚链(或杠件)连接浮筒与桩基(或吸力锚)并设有万向接头,浮筒半浮于水面,船舶通过系泊缆与浮筒连接,船舶与浮筒可绕桩基做 360° 旋转,海底管线自桩基通过柔性软管与 FPSO 连接,旋转接头设置在桩基上,如图 2 所示。

目前,世界上已有十几套 SALM 系统投入使用,主要由 SOFEC 公司和 APL 公司生产。在国内,中国船舶研究中心也开展了对于永久 SALM 单点系泊装置的相关研究,并在“西江 24-3”油田现场进行了相关的现场测试、模型试验和计算分析,取得

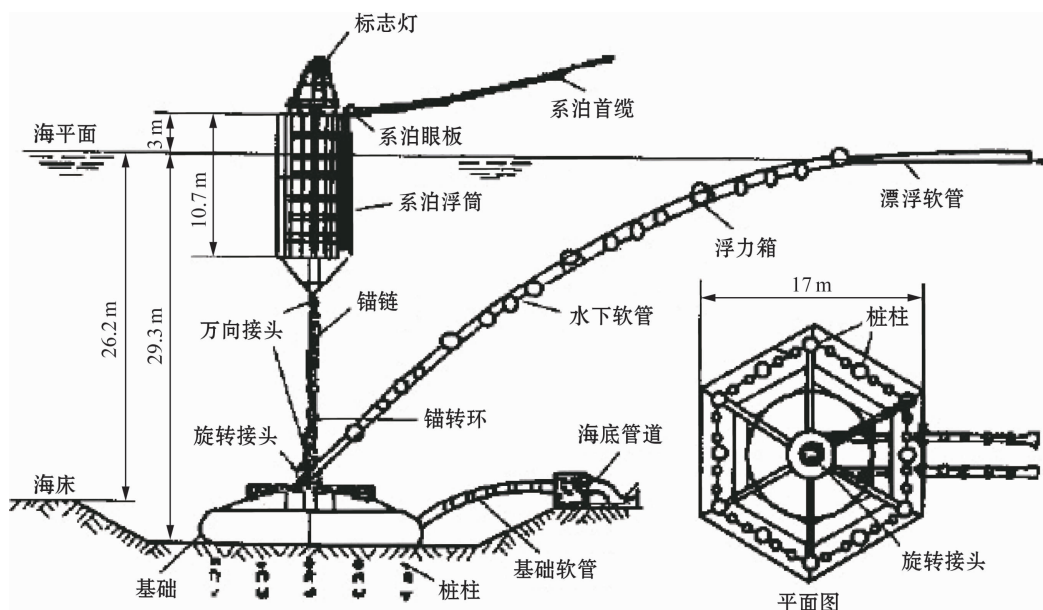


图2 单锚腿系泊系统

Fig. 2 Single anchor leg mooring system

了一定的成果。SALM 系泊系统适用水深为 30~150 m,而以水深 50~80 m 为佳。

3 塔式软刚臂系泊系统

传统的 SYS 装置实际上就是将塔式结构物固定在海床上,此塔式结构物也可称为系泊平台或系泊塔。FPSO 上设置有系泊构架,通过系泊腿与刚臂铰接;刚臂铰接系泊头,并通过万向滑环与系泊平台连接。FPSO 可绕系泊塔随风浪、潮流做风标旋转,并可随浪涌在一定的范围内升降摇摆,恢复力由刚臂的配重提供,配重形式分为三种:靠近 FPSO 配重、靠近系泊塔配重以及水下配重。系泊塔上部为软管平台,设有流体旋转头。软管悬跨在软刚臂上,两端由系泊架构和软管平台上的弧形板提供支撑,如图 3 所示。

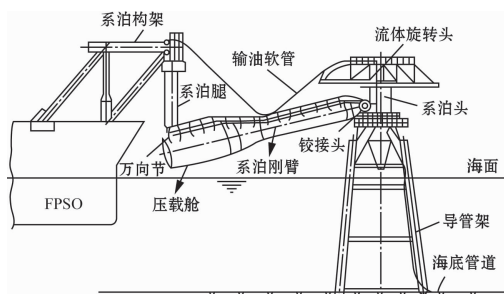


图3 塔式软刚臂系泊系统

Fig. 3 Soft yoke mooring system

另外,还有一种水下软刚臂系泊系统,该系统也

是由系泊塔、上部结构、刚臂、系泊腿、FPSO 系泊架构及跨接软管和电缆组成。其与传统 SYS 的区别在于采用锚链式系泊腿,刚臂及其转动装置完全浸没于水中并接近海床,用独立柱式结构替代导管架,如图 4 所示。相较于传统的 SYS,水下软刚臂系泊装置在系泊系统和塔架结构上进行了简化,减少了钢材用量,在节约成本的同时也减轻了系统重量。采用塔柱结构减少了所受冰载荷,立管设置在塔柱套管内部,将不受环境力影响。但是,由于系统的关键系泊装置均在水下,所以其在检测维护等方面的要求较高。



图4 水下软刚臂系泊系统

Fig. 4 Underwater soft yoke mooring system

不论水上还是水下 SYS 系泊系统,其作业水深一般小于 40 m^[3]。在中国渤海,软刚臂单点系泊是 FPSO 系泊的主流方案,工程实例较多。例如目前

服务于 BZ28-2S 油田的海洋石油 102, 采用的是水上软刚臂的单点系泊系统; 服务于 BZ25-1 油田的海洋石油 113, 采用的是水下软刚臂系泊系统, 见图 5。



图 5 SYS 系统实例

Fig. 5 Examples of SYS system

4 转塔式系泊系统

TM 的工作原理与前文所述的单点系泊方式一样, 以某种连接方式将 FPSO 固定于海上某一系泊点, 并使其可随环境力绕系泊点做 360° 旋转, 形成风标效应, 降低系统在环境力作用下的载荷和运动响应。转塔式单点系泊可适用于全球任何海域, 相较于前文所述的单点系泊系统, TM 对于台风、飓风

多发, 无法固定波向和风向的海域具有很好的稳定性, 并且适用于各种水深海域。转塔式单点系泊按结构形式又可分为外转塔式 (ETM) 和内转塔式 (ITM)。

鉴于我国南海恶劣的海况条件, 以及深海油田的开发, 转塔式系泊系统必然是南海 FPSO 系泊的主要方式。

4.1 外转塔式单点系泊系统

传统的外转塔单点系泊为立管式转塔系统 (RTM)。该系统由 CALM 与 SALM 系统综合发展而来, 见图 6(a)。系泊立管由锚链固定于海床, 恢复力由刚性立管的压载力矩传递, 缓和了悬链系泊中的载荷突变。采用刚性转塔和机械连接器代替 CALM 的系泊缆, 使得 FPSO 与系泊点对环境载荷的响应趋于一致, 相较于 CALM, 在一定程度上增强了对复杂海况的适应性。RTM 虽然具备解脱与回接功能, 但是由于刚性立管富余浮力的存在, 在波浪影响下不利于回接。

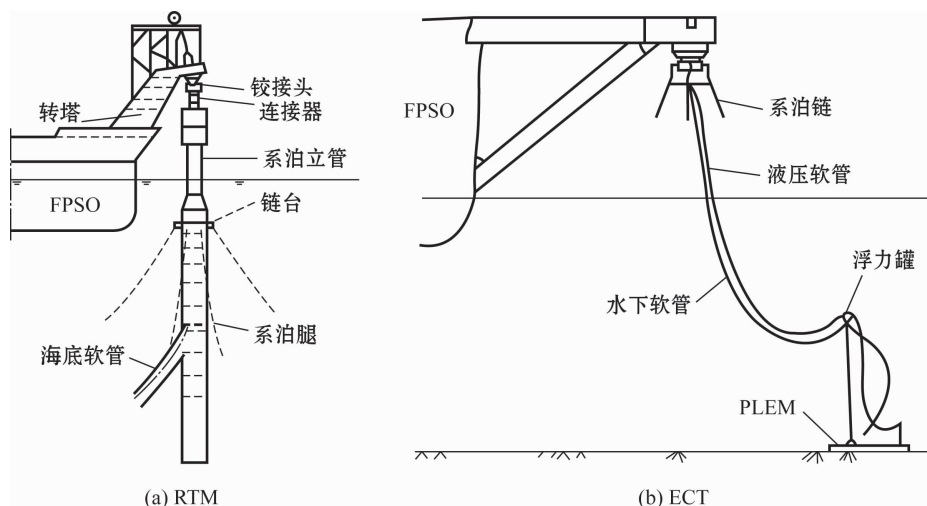


图 6 RTM(左)与 ECT(右)示意图

Fig. 6 Schematic diagram of RTM and ECT

随着对外转塔系泊技术的改进与发展, 目前世界上所使用的外转塔系统多为悬臂式外转塔系统 (ECT)。ECT 是一种永久性的单点系泊系统。旋转轴承和转塔安装在由船艏或船艉伸出的大型悬臂钢结构物上, 旋转轴承外圈连接到悬臂上, 内圈与塔的固定部分结合。这种结构方式使得转塔从船艏或船艉向外延伸一段距离, 并保持在水面之上。悬链下端固定于海床, 上端连接至转塔下部边沿的系泊链终端, 由悬链提供回复力。柔性立管由转塔底部

接入, 见图 6(b) 及图 7。ECT 系统允许直接在码头安装, 并且不占用 FPSO 的甲板面积和仓容, 减少了对船体的改造, 便于转塔的维修和检查。但是转塔位于水面之上也存在一些问题: 由于柔性立管和脐带系统上部可能会受到较大的波浪影响, 在设计波高较高的危险海域, 为不使转塔底部系统发生波浪砰击, 转塔的位置需要设计得更高; 同时, 为避免船体与系泊索相互碰撞, 悬臂也需设计得更长。

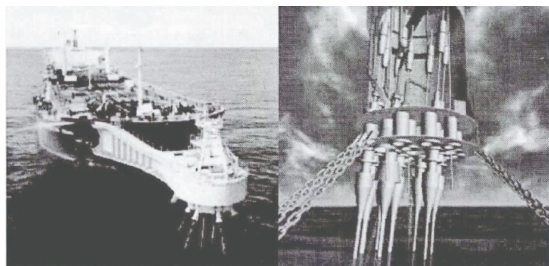


图7 悬臂式外转塔系统

Fig. 7 Cantilever external turret mooring system

综上所述,无论是 RTM 或是 ETC,综合经济性和可行性等诸多方面考虑,较适用于海况条件较平缓的海域,若在环境恶劣的海域中,由于系泊机构受力增大,将会增加投资和建造难度。外转塔系泊装置适用于船体内部空间紧张以及旧油轮改造的情形,较之前面几种系泊方式,其在波浪响应和适用水深范围上还是具有相当明显的优势的。若是在海况平稳的海域使用,ETM 无疑是一种经济性和稳定性俱佳的可选方案。目前主要有 SOFEC 和 SBM 单点公司设计制造外转塔式单点系泊装置。

4.2 内转塔式单点系泊系统

ITM 是近年国际上较为常用的单点系泊装置。这种系统可靠性高、抗风浪能力强、具有良好的风标效应,根据不同的需求可设计成解脱式或不可解脱式,具备 15 年以上连续不间断的生产能力。ITM 系统又可分为浮动式内转塔系泊系统(BTM)和沉没式内转塔系泊系统(STL)。

BTM 由系泊浮筒和系泊转台两部分组成,如图 8 所示。浮筒包括浮筒本体和系链台,系泊腿一端固定于海床,一端连接至系链台。浮筒提供支撑系泊腿和立管重量的浮力,在 FPSO 解脱时,浮筒浮于水下一定深度的某一位置。系泊转台镶嵌于 FPSO 的船艏位置,贯穿船体并突出于甲板以上一定高度,转台下部通过轴承装置连接于船底。转台

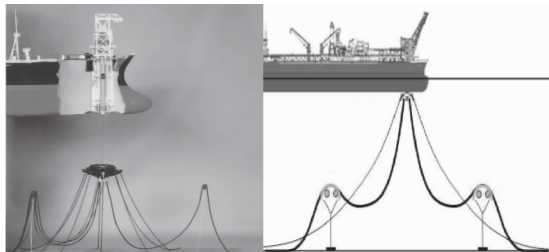


图8 浮动式内转塔单点系泊系统

Fig. 8 Buoyant turret mooring system

与浮筒由结构连接器连接,系泊载荷通过轴承传递至浮筒,再由系泊腿配重链提供回复力。

BTM 相比于外转塔单点系泊装置,其转塔设置在船体内部,转塔的安装可以在船坞完成,大大减少了海上的施工量。另外,这种关键设备在船体内部布置的形式,允许人员在恶劣海况下靠近关键设备对其进行维修保养。若是可解脱式 BTM 系统,系泊浮筒沉没于水下,相较于 RTM 具有更好的回接性能。虽然有诸多优点,但由于浮筒仍然暴露在船体以外,仍会受到一定程度的环境力影响,所以限制了其在更高海况中的应用。

目前有三艘采用 BTM 单点系泊系统的 FPSO 服务于我国南海,包括南海胜利号、南海发现号以及南海开拓号,其中两艘的照片见图 9。从外观上看,采用 BTM 单点系统的 FPSO 均有一突出于甲板的转塔结构,其中南海胜利号为不可解脱式 BTM,南海发现号和南海开拓号为可解脱式 BTM。

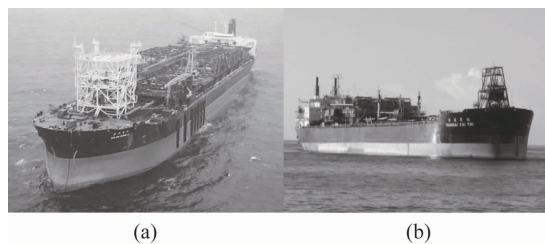


图9 采用 BTM 的 FPSO 实例

Fig. 9 Examples of FPSO with BTM system

在 BTM 系统的基础上,随后发展出了一种更具优越性的单点系泊系统,即 STL。STL 在设计思路上与 BTM 基本一致,但是在具体结构上存在区别,主要表现在浮筒上。STL 所采用的浮筒为圆锥型浮筒,转塔部分依旧设置在船体内部,在 FPSO 船腹与浮筒连接处设有一锥形的浮筒穴。当浮筒与转塔连接时,浮筒将完美契合于浮筒穴内,与船体成嵌套式链接,如图 10 所示。这种形式使得浮筒在波浪中的受力情况优于 BTM 浮筒。浮筒内为链接系泊腿与立管系统的转台,外部连接设置在船体内的转塔,在系泊状态时,浮筒外部可与船体一起绕转台转动,解脱后,浮筒浮于水中。它具有灵活、安全、经济等特点。在 STL 系统的基础上,为满足 FPSO 的生产需求,发展出了沉没式转塔生产系统(STP)。STP 系统与 STL 系统在系泊结构上相同,区别在于,STP 在 STL 的转塔和系泊技术的基础上,更结合了多功能旋转接头。多功能旋转接头由生产集液旋转接头、电刷接头、液压控制接头和电信号接头自

下而上搭接而成,是井口油、水、气、信号、电力从立管内传至 FPSO 管道系统的唯一通道^[4]。沉没式转塔系泊系统的作业水深在 50~1 500 m 之间,较之 BTM 系统,具有更高海况作业能力,安全性能出色。若是可解脱式,可在任意气候条件下解脱以规避极端恶劣环境;若是不可解脱式,按百年一遇的海况设计,也可在飓风、浮冰等各种恶劣海况中安全作业。另外,其结构简单紧凑,浮筒标准化设计并嵌入船体,在得到很好保护的同时也易于检修和维护。

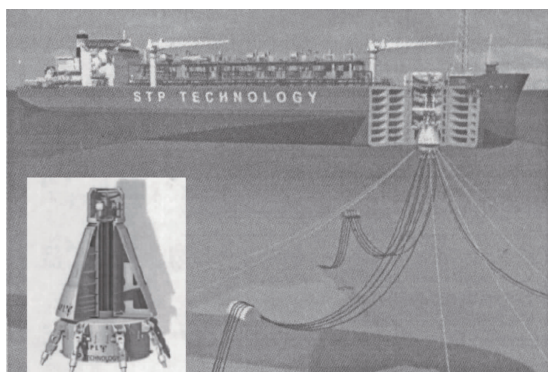


图 10 STP 单点系泊系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of STL single point mooring

另外,以单系泊腿受力最大作为初始条件,经研究显示,系泊腿分组布置较之对等布置,其锚腿的最大张力将减少 20% 左右,最大偏移量减小 5%^[5]。因此,STP 系统的系泊腿布置形式不同于早期 BTM 系统的对等布置,均采用分组布置。2000 年后在我国南海建造并投入使用的 FPSO 均为采用 STP 浮筒的沉没式内转塔单点系泊系统,其中包括服务于番禺油田的海洋石油 111、服务于西江油田的海洋石油 115、服务于文昌油田的南海奋进号以及服务于新文昌油田群的海洋石油 116,其中两艘的照片见图 11。按照我国现行的海洋石油作业要求,以上 FPSO 采用的均为不可解脱式 STP 单点系泊系统。



图 11 STP 系统 FPSO 实例

Fig. 11 Examples of FPSO with STP with STP system

5 结 语

单点系泊系统的选择首先应考虑其用途。作为海上油气田开发工程 FPSO 的配套设施使用,应选择转塔或 SYS 类单点系泊;若是作为固定码头的补充或替代设备,则 CALM 和 SALM 更为合适。在单点形式的选择上,并没有绝对的优选方案。我们应在确定其用途的基础上,再综合考虑水深、海况、海底土壤地貌以及经济性、可行性等诸多方面来选择单点系泊的形式。

随着海洋石油开发向深水和超深水发展,FPSO 已然成为海洋工程的热点。目前我国在 FPSO 的建造方面已经具备自主研发和建造能力,但在 FPSO 海上定位方面基本上完全依赖国外单点系泊技术。本文对目前世界上采用的主要单点系泊系统进行了介绍。以我国 FPSO 单点系泊技术的使用情况看,渤海海域主要采用 SYS 系统,单点厂家为 SBM 或 SOFEC;南海海域在 2000 年以前建造的 FPSO 单点系统均为 BTM 系统,而 2000 年以后新建单点系统均采用 STP 系统,单点厂家为 APL。南海胜利号作为南海挑战号半潜式平台作业海区服务的 FPSO,其作业水深达到 300 m 以上;除此之外,南海其余 FPSO 作业水深均小于 150 m,配合导管架式平台使用,仅发挥了 FPSO 的远岸作业优势,并未发挥其深水优势。随着我国在半潜式平台研发建造上的突破,我国南海的 FPSO 必将作业于更深海域。单点系泊是中深水油气开发工程中 FPSO 的核心技术,如何实现单点系泊系统的自主设计建造安装是有待解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 沈苏雯. 深水 FPSO 系泊系统[J]. 中国船检, 2012(11): 74.
- [2] 陈浩. 浅谈单点系泊技术的应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(14): 123.
- [3] 刘志刚, 何炎平. FPSO 转塔系泊系统的技术特征及发展趋势[J]. 中国海洋平台, 2006(5): 1.
- [4] 李展. 浮式生产储油装置(FPSO)及其系泊系统[J]. 广东造船, 2006(3): 40.
- [5] 海洋石油工程设计指南编委会. 海洋石油工程设计指南: 海洋石油工程 FPSO 与单点系泊系统设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.