

FPSO 系泊系统设计上的考虑

吕立功, 景勇, 温宝贵, 刘振国

(中海石油基地集团采油服务公司)

摘 要

作为具有高科技含量的系泊系统, 是 FPSO (浮式生产储/卸系统) 的关键组成部分。根据不同的环境条件和作业要求, 其系泊方式也是不同的。其中单点系泊系统 (Single Point Mooring System, 简称 SPM) 用的最多、最普遍。

本文从介绍 FPSO 系泊系统入手, 对目前应用较为广泛的几类系泊方式进行了较为详细的介绍。然后结合实际, 重点对 FPSO 单点系泊系统在设计上需要考虑的内容进行了分析。最后对中国海域 FPSO 系泊系统的应用进行了简单的介绍。

关 键 词: FPSO 系泊系统; 单点系泊; 多点系泊; 动力定位; 单点设计

1 引 言

根据不同海域/海况条件, 目前世界上的 FPSO 主要采用如下的系泊方式: 单点—转塔系泊系统 (Turret mooring)、多点—伸展系泊系统 (Spread mooring) 及动力定位系统 (Dynamic positioning), 其中以单点系泊系统 (SPM) 的应用最为普遍。如墨西哥湾, 南中国海等, 必须采用转塔系泊。在这种情况下, FPSO 可以根据风向调节它的对地静止的转塔以使环境载荷最小。在良好海况下, 如东南亚、西非, 或者具有高度定向性的环境下, 如巴西海洋的特定区域等 FPSO 可以采取多点系泊方式。

2 FPSO 系泊系统简介

2.1 单点系泊系统

单点可以减少昂贵的港口费用或港口紧张对在油轮和岸基之间的输送液体的影响; 可以为 FPSO 在海上提供一个固定系泊点, 该系泊点需能承受 FPSO 因风、浪、流产生的系泊力和位移 (系统内同时产生大小相等、方向相反的恢复力), 当外力消除后, 依靠单点的恢复力使 FPSO 回复到它的初始平衡位置; 可以为海底管线、电缆提供一个连接界面。在 FPSO 的应用中, 主要表现为后两个作用。

第一座单点系泊系统诞生于 1959 年, 为瑞典皇家海军所有, 由 IMODCO 公司开发研制; 悬链锚腿 (CALM) 系统, 系泊油轮 3×10^3 t (DWT), 水深 46m, 1 根 4 英寸漂浮输油软管, 是作为军舰油料补给终端来使用的。据权威资料介绍, 第 1 艘用单点 (SPM) 系泊的浮式储油装置 (FSO) 出现于 1972 年, 安装在突尼斯海上油田。在当时这是一种含有崭新理念的新型设施, 它产生的原因是, 分析比较发现, 用 FSO 在海上储存原油比通过海底管线将原油输送到岸上油罐储存, 有明显的经济优势。截止上世纪 80 年代中叶, 世界上已有 300 多座单点。悬链锚腿 (CALM) 单点占总数的 80% 以上。到本世纪初, 把系泊 FPSO 和 FSO 的单点考虑在内, 单点总数约在 500 座左右。

单点系泊系统的分类方式众多。美国船级社 ABS 将单点系泊系统分为, 悬链锚腿系泊系统

CALM(Catenary Anchor Leg Mooring),单锚腿系泊系统 SALM(Single Anchor Leg Mooring),转塔式系泊系统(Turret Mooring)和软钢臂(Soft Yoke)四大类。

按照系泊方式可以分为:浮筒式系泊(Buoy Mooring)、塔式系泊和转塔式系泊。

(1) 浮筒式系泊系统

浮筒被锚泊在海上,作为一系泊点为 F(P)SO 装/卸气体或液体产品服务,与具有风向标效应的 F(P)SO 之间的连接。浮筒主要用途是为井口平台与 F(P)SO 之间传输液体提供连接界面。

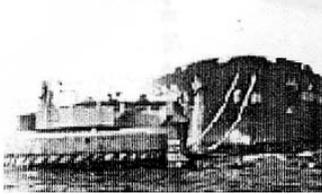


图 1 CALM

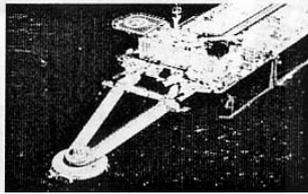


图 2 CALRAM

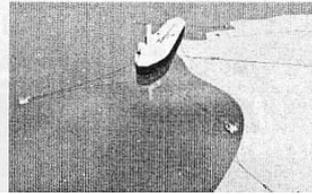


图 3 CBM

浮筒式单点主要由以下几部分组成:浮筒(Buoy Body)、系泊锚链部件(Mooring and Anchoring Components)、产品传输系统(Product Transfer System)和辅助部件(Auxiliary components)。其中浮筒主要是为装置提供浮力和稳定性,同时容纳各种各样的零部件;锚链装置是将浮筒连接到海床,系泊缆绳是将装/卸载 F(P)SO 或油轮连接到浮筒上;生产滑环提供浮筒生产管系的固定部分和具有风向标效应的旋转部分之间的界面;辅助部件主要指值班船停靠、起升和操作设备,防护物,助航设备和动力提供。

最通用的浮筒式单点系泊系统包括 CALM(Catenary Anchor Leg Mooring Buoy)、CALRAM(Catenary Anchor Leg Rigid Arm Mooring)和 CBM(Conventional/Multi Buoy Mooring)。其中 CALM 主要用于海上设施与 F(P)SO 之间液体的输入和输出的短期系泊;用于生产和储存系统的永久系泊;具有易解脱功能的永久系泊,在恶劣气候下可以解脱。这种系泊方式具有灵活、经济和可靠等优点。CALRAM 的原理与 CALM 浮筒的原理相似,区别在于 F(P)SO 与浮筒的连接上,CALRAM 采用硬钢臂代替缆绳,这种浮筒系泊方式只能用于永久系泊。并且硬质系泊钢臂消除了 F(P)SO 与浮筒脱离和碰撞的风险;CMB 也称 MBM(多浮筒系泊),至少有 3 个浮筒,CMB 不允许 F(P)SO 或油轮有风向标效应。

(2) 塔式(Tower)系泊系统

塔式系泊系统是把固定塔结构固定在海床上,为永久系泊的 F(P)SO 或油轮装卸载生产油气提供一个锚点。

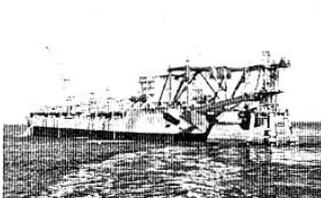


图 4 水上软钢臂



图 5 水下软钢臂

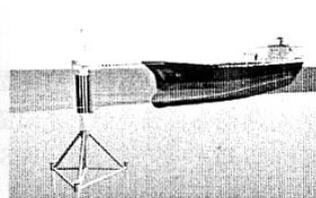


图 6 塔式缆绳

最常见的塔式系泊系统主要有塔式水上软钢臂系统、塔式水下软钢臂系统和塔式缆绳系统。塔式水上软钢臂系统是浅水常用的塔式系泊系统,该系泊系统也能够用于强海流环境的 F(P)SO 或油轮系统的系泊,主要部件包括固定塔、软钢臂和产品传输系统(主要由立管、旋转通道和跨接软管组成);塔式水下软钢臂系统的 YOKE 完全浸于水中,使得它受海浪和潮汐的影响较小,该系统已经成功应用于环境恶劣(如北海海域)和大吨位 F(P)SO 系泊;塔式缆绳系统与常规的软钢臂系统相似,比塔式水上软钢臂系统更加简单。由于采用缆绳装置,该系统比较适合外输作业的时间间隔相对固定的情

况。

(3) 转塔式(Turret)系泊

转塔式系泊系统是一种集系泊、油气和电力输送为一体的系泊系统,对缆绳、浮式软管、转塔旋转系统或者推进系统没有特殊要求。转塔能够接收 50 条以上立管和/或信号、电能等传输的管束,转塔可以设计成内转塔式也可以设计成外转塔式。通过一钢质结构与船体的船头或船尾相连,允许 FPSO 产生风向标效应,绕转塔 360 度旋转。

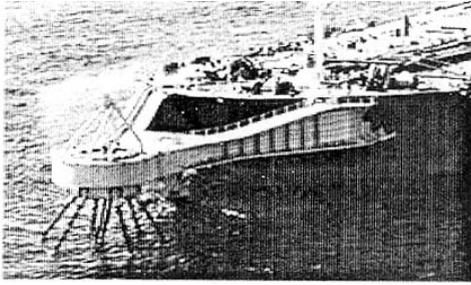


图 7 外转塔

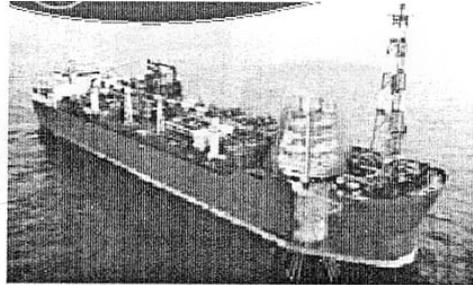
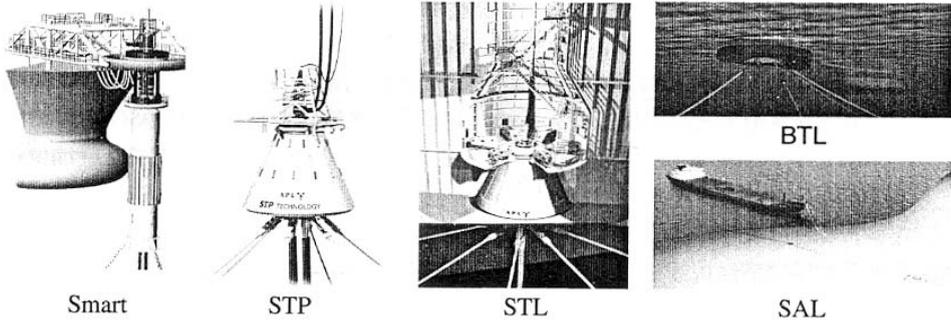


图 8 内转塔

转塔式系泊系统主要有外转塔系泊和内转塔系泊系统两种,如图 7 和图 8。外转塔系泊系统由一钢质箱体型结构组成,该结构能够从 F(P)SO 的船头或船尾靠拢或者延伸一段距离,并为旋转轴承和转塔提供基座,链腿通过锚或桩固定在海床上。当正常生产时,允许 F(P)SO 绕转塔产生风向标效应。内转塔系泊系统一般在靠近 F(P)SO 船艏部份,它被支撑在一个大的滚柱轴承上。轴承的外圈被连接到船体上,而内圈与塔的固定部分结合为一体。

(4) 其他灵活的单点系泊系统



2.2 多点系泊系统

多点系泊系统允许 FPSO 系泊在固定位置。与单点系泊的区别在于,该系统的系泊和传输功能不是一个整体,而是各自独立的。系泊链直接与 FPSO 相连,液体传输模块通常悬挂在 FPSO 的舷侧,由管汇终端 (PLEM) 作为立管与 FPSO 的连接界面;另外,该种系泊方式的 FPSO 不具有风向标效应。

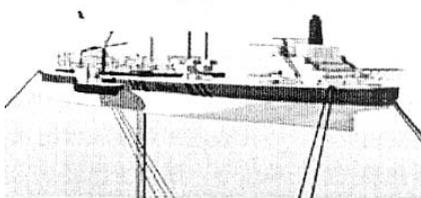


图 9 多点系泊

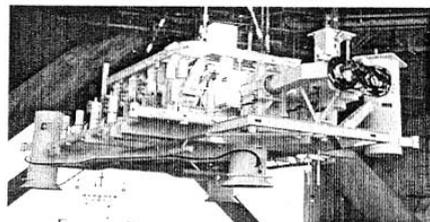


图 10 管汇终端 (PLEM)

多点系泊方式由于自身的原因,它主要用于环境温和、外输频率低或者小型 FPSO;该系统仅仅被推荐用于环境温和固定船,一年四季相同的主要风浪方向。

2.3 动力定位系统

除上述的系泊系统外,对某些特定的条件,全动力定位(Dynamic Positioning)也是一种选择。该概念是结合现有的 FPSO 技术及最新一代的钻井船技术,将其用于深水 FPSO 的动力定位及操作。

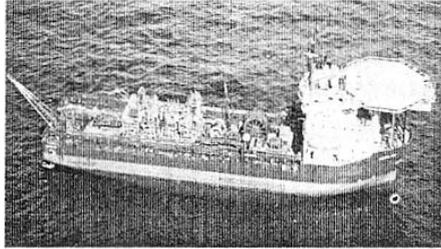


图 11 动力定位 FPSO (Crystal Sea)

根据中国南海的海况条件,深水 FPSO 的系泊系统应该首选内转塔系泊系统(对新建的 FPSO)及外转塔系泊系统(对改装的 FPSO)。

鉴于中国南海的海况条件,转塔式系泊系统应该具备更多的优越性,应该加以考虑。

3 FPSO 系泊系统设计上的考虑

单点系泊系统的型式很多。但是,无论那种系泊系统,按照物理概念,都可以简化为“质量-弹簧系统”进行研究。FPSO 是集中质量,在质量上作用着一个大小、方向随机变化的扰动力;悬链系统或软刚臂系统则是弹簧。弹簧刚度对整个系统的运动和受力的影响是很大的。因此,合理选择弹簧刚度是单点设计的重要任务之一。

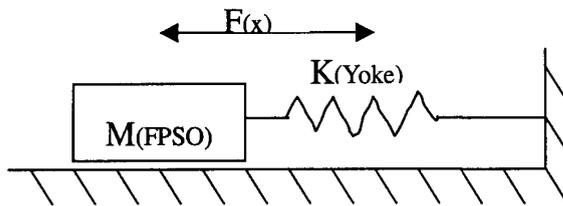


图 12 FPSO——单点物理概念图

目前,单点系泊系统运动和受力的计算分析方法有 2 种:准静力法和动力法。SBM 公司在“友谊”、“明珠”单点设计时,用的是准静力法。

研究分析系泊系统的运动和受力,涉及的理论主要为流体静力、流体动力、波浪理论、波谱理论以及统计理论。目前已经开发出多个计算机软件,船级社对定位系泊系统的建造和人级也有了专门的规范。单点或多点系泊系统的计算分析、设计、建造及使用越来越趋于成熟。

通过对已经使用过的和正在使用的系泊系统的分析,在以后的设计建造过程中需要在以下几个方面加以注意:

3.1 设计环境标准

通常情况下, FPSO 系泊系统的设计为 100 年当地风浪流环境。对于不同的地方,有两个基本现象需要考虑:①冬季风暴;②热带风暴(包括在墨西哥湾的飓风和南中国海的台风)。这两种环境是不一样的,诸如发生在北海北部地区和加拿大东部海域的冬季风暴都是可以预测的,并且有一个较长万方数据

的持续期和一个较大的范围,风速一般保持在大约 100m/h。但是热带风暴恰恰相反,它很快就会从 1 级(74m/h 左右)巨变到 5 级(155m/h 左右)。所以,冬季风暴的设计波高比热带飓风要高,主要是因为冬季风暴的持续期更长。另外,由于热带风暴的高度不确定性,要求系泊系统进行冗余设计,防止出现超过 100 年一遇的环境。

对于允许船产生风向标效应的情况,在选择设计环境标准时,必须重点考虑风浪流的非线性环境和设计波浪周期范围。非线性的风浪流环境应该根据最坏的装载来估算。

3.2 船体设计特点

通常情况下,FPSO 船体的主要参数的选择是根据要求的储油量和上部模块的功能确定的。船体的本身尺寸、甲板和船体的布置将决定作用于船体的风浪流力和力矩。船形、船体几何特点、重力位置、重力中心,以及纵摇、艏摇和横摇旋转半径将决定流体静力学和运动响应特点。

在系泊系统的解脱设计与永久性系泊设计初期,FPSO 被设计成在遇到严重风暴时解脱。这种设计形式适合于热带海域,因为那里多数时间环境条件良好或适中。当风暴到来时,FPSO 与系泊系统解脱,离开风暴影响区。由于回接作业对浪高的限制比解脱作业更加严格,因此,解脱设计不适合多数时间遭受波浪袭击的海域。对于可解脱式,由于 FPSO 不能很快与系泊系统回接,停产时间会很长。在多数情况下,我们一般采用内转塔,辅以侧推器。

3.3 船体位移和偏差

在设计的风浪流环境条件下,船体的位移和偏差存在三部分:

- 平均稳定位移和平衡船体艏向(由于风浪流的首摇力矩和静态平均力产生的);
- 由于变化缓慢的风浪漂移力产生的低频运动;
- 由于一阶波产生的波浪周期运动;

系泊链的张力必须与船体的位移位置、艏向和运动相一致。平均位移和低频运动都是系泊系统强度功能,系泊系统的强度可以按照环境条件进行调整最初的设计,设计要求越高,船体的位移就越小。但是,强度要求越高,产生巨大的系泊链张力的可能性就越大。如果是柔性立管,位移量将会比较大,对设计要求就会比较低。最大系泊张力的降低将大大减少在恶劣的飓风环境下系泊系统的可靠性。

3.4 转塔位置和船体风向标效应

对于内转塔式的系泊系统,FPSO 上的转塔是通过系泊系统固定在海床上,系泊链安装在转盘上允许船体风向标效应。塔的位置可以在船艏和船中站之间的任意位置,具体的位置决定于预定环境下风向标效应的能力。塔越靠近中站,产生风向标效应的能力就越弱,需要借助外力完成绕塔旋转,通常采用推进器;塔越远离船中站,越容易产生风向标效应。对于塔位于船艏或船艏附近,船体不需要推进器,靠自己就能产生风向标效应。但是同时,系泊链上部的垂直运动增加,垂直运动将会增加运动张力。

生活区一般设置在位于工艺模块的上风处,目的是为了塔离船艏远一些。船体的风标效应需要推进器才能完成。船上一直有船员操作,但是增加了电站、推进器和控制系统失效的风险。

在热带风暴多发区,例如墨西哥湾和南中国海,通常人员在台风到来之前撤离。因此,转塔必须位于或靠近船艏,使得船本身具有风向标效应,而不用侧推器协助。船的风向标效应对减小作用在船体上的环境荷载是很重要的。它可以减小定位系统需要承受的力,减小 FPSO 遭受横浪的潜在危险。减小了加速度对生产设施的影响,FPSO 将更加稳定。

3.5 系泊链的分布

对于 FPSO,大量的立管需要通过塔,由于空间的限制,系泊链与立管的空间布置是一个重点考虑的问题。

采用散射系泊相对而言,限制空间的烦恼不是很明显。对于转塔式系泊方式,在生产操作期间进行立管安装相对较难,并且不容易进行检测检验;由于立管聚集在狭小的空间,一旦发生泄漏,将更加容易发生爆炸。但是对于散射系泊由于立管是沿船体外表面,相对转塔式系泊更容易产生高速碰撞,尤其是在供应船从 FPSO 更远处向岸边返回的时候。

对于系泊系统的基本方案已定, 我们仍然需要解决立管限制空间的问题。对于转塔式系泊系统的系泊链采用组式系泊 (Grouped Mooring) 模式, 如图示 13。

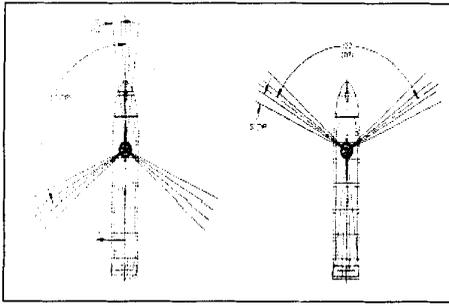


图 13 组式系泊

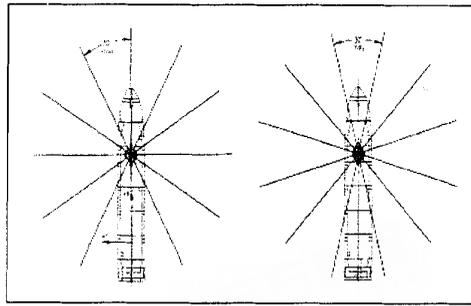


图 14 平均散射系泊

相对平均散射系泊 (Equally Spread Mooring) 模式, 如图 14。根据相关机构的实验结果证实: 最大张力, 组式系泊模式要比平均散射系泊小 20%; 在恶劣环境下的最大偏移量, 组式系泊要少 5%。所以组式系泊有更多的冗余防止系泊失效。

3.6 系泊链的构造

对于转塔式系泊系统, 传统的系泊链一般由锚链和钢丝绳组成, 并在系泊链上装有沉箱浮体和/或配重。

对于浅水系泊, 由于水浅, 悬链线效应很小或不复存在。载荷——位移静特性曲线的非线性变得十分明显。在极限载荷条件下, 锚链可能过分张紧, 即弹性很小 (刚度大) 而导致系泊力剧增。浅海波浪非线性严重, 选择计算分析 FPSO 二阶低频慢漂运动传递函数的软件时须考虑是否适用于浅水。对于浅水水域, 由于 FPSO 这样的庞然大物存在, 而产生海流阻塞效应, 使作用在船体上的流力增大; 船底下流速增大而产生吸底效应 (吃水增加)。在浅水中, 悬链线的立面形状比较平坦, FPSO 漂移时, 存在与之碰撞的危险。

图 15 是典型的浅水系泊链, 在浅水 (100m 以下) 中, 均采用系泊链。为了节约成本, 在接地部分可能运用比较轻质的钢丝绳来代替系泊链。在浅水中要求较长的系泊链, 多余的部分主要用于防止锚的提升力。常常采用弹性的系泊链, 因为太硬的系泊链不能很好承担船体运动产生的运动载荷。

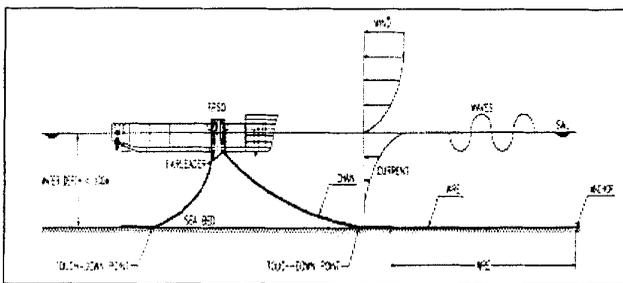


图 15 浅水系泊链构造

深海系泊系统设计的最大问题是: 垂向载荷增加、水平恢复力降低和 FPSO 的漂移增大。对于悬链系泊系统而言, 系泊线的长度与水深成一定的比例关系。水越深, 锚链越粗, 重量越大。而系泊线的悬链部分 (除了卧在地面上的部分外) 的重量全部由船体承担, FPSO 需要牺牲宝贵的载重量 (DWT) 为代价。因此, 设计者想方设法降低系泊线单位长度的重量。对于深水 (300m 以上) 系泊, 悬浮部分常常采用钢丝绳, 增加系泊链的强度减少上部张力。同等强度下钢丝绳的单位长度重量是锚链的 1/3~1/5。在超深水 (2000m 以上) 系泊中, 如果采用传统的锚链——钢丝绳系泊, 自重非常之大, 并且水平方向太柔, 无法承担外界环境的载荷。锚链——钢丝绳也变得不适用了, 而采用更轻的聚酯纤维缆替代钢丝绳, 如图 16。它的优点是: 强度/重量比大、弹性好; 成本也比钢丝绳低得多, 最多

达 50%。研究分析表明，聚酯纤维缆在深水、环境条件恶劣的海域应用，有十分明显的优势。

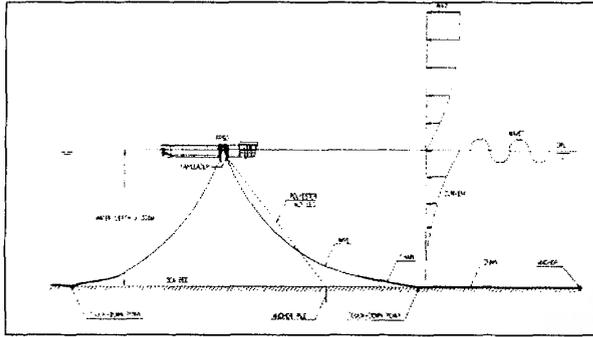


图 16 深水系泊链构造

另外，我们可以采取如图 17 所示的潜入式浮筒来克服深水系泊问题。这些浮筒将减少作用在塔结构上的由于悬浮在水中系泊腿产生的巨大重力的垂直载荷。在导缆器处，由于系泊腿重力产生的垂直载荷被浮筒降低时，系泊系统的强度也因此被增加。

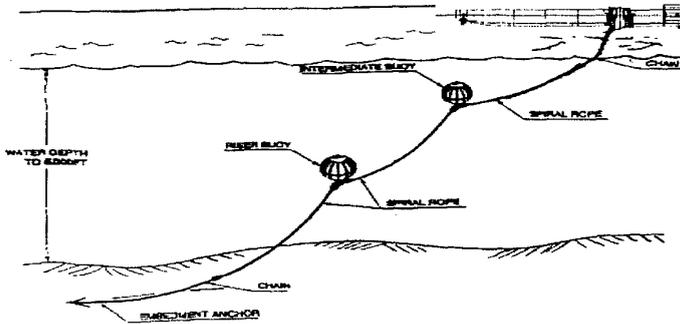


图 17 潜入式浮筒的系泊系统结构

另外，这些浮筒还能够提高：

- 安装和维修作业；
- 清理立管或者其它障碍物。

在立管浮筒下方的系泊腿部分可以提前安装，以减少 FPSO 现场安装连接的时间。通过减少系泊线的张力，这些浮筒可以慢慢将系泊线送到水面进行检察和维护。这些浮筒也可以使系泊线与临近的立管和海底管线保持一定距离，防止发生接触碰撞。

3.7 锚泊系统

固定在海床的锚泊点是系泊系统保持 FPSO 固定在一定位置的关键部分。根据海床的状况和系泊性能要求不同，可以采用不同类型的锚。主要有两种：

- 传统的拖曳嵌入式锚
- 设计成抵御垂直载荷的锚，诸如桩基、吸力和垂直载荷基盘锚（VLAs）

VLAs 锚在离开海床后，将完全失去能力。相比较而言，传统的拖曳嵌入式锚即使在恶劣环境下产生一定运动后还能具有相当大的维持能力。另外，在现场海床土壤分析中也存在一些不确定因素，因此 ABS 对 VLAs 提出了比传统锚更高的安全要求。两种类型锚的安全要素比较如下：

完整设计环境条件	
VLA	2.0
传统锚	1.5
单链断裂设计环境条件	
VLA	1.5

传统锚 1.0

传统的拖曳嵌入式锚被认为比 VLA 有更多优势。万一设计超过环境设计条件, 将促使锚移动, 拖曳锚仍然能够维持自身的能力。另外, 随着锚的移动, 系泊链的张力将能够在链之间进行相互调整。

4 中国海域 FPSO 系泊系统

1986 年, 用于南海涠州 10-3 南海希望号 FPSO 系泊的固定塔式单点系泊系统, 这是我国第一座单点系泊系统。茂名石化公司于 1994 年建成并投入使用, 这是我国第 1 座原油进口终端, CALM 系统、可系泊 250000 t(DWT) 运输油轮。之后, 在涠西南油田群安装并交付使用了可系泊 60000 t(DWT) 运输油轮的外输终端, 亦为 CALM 系统。

目前, 在我国, FPSO 的系泊方式全部采用单点系泊, 主要有内转塔式、水上软钢臂和下水软钢臂三种形式。

表 1 中国海域 FPSO 系泊方式统计表

序号	FPSO	系泊方式	作业水深 (m)
1	渤海友谊号	水上软钢臂	24
2	渤海长青号	水上软钢臂	22
3	渤海明珠号	水上软钢臂	31
4	渤海世纪号	水上软钢臂	19.96
5	海洋石油 112	水下软钢臂	24
6	海洋石油 113	水下软钢臂	22
7	南海发现号	内转塔	116
8	南海盛开号	内转塔	141
9	南海开拓号	内转塔	100.6
10	南海胜利号	内转塔	310
11	南海陆宁号	内转塔	333
12	南海奋进号	内转塔	330
13	海洋石油 111	内转塔	97

从我国海域来讲, 渤海湾环境比较温和, 作业水深也比较浅 (20m 左右), 不宜用悬链系泊系统, 因为悬链效应几乎不复存在。比较适合塔式软钢臂, 尤其是水上软钢臂。南中国海环境比较恶劣, 属于热带风暴地区, 作业水深一般在 100m~350m 左右。在风暴来临之前, 作业人员需要离开 FPSO, 而 FPSO 不需与系泊系统解脱, 采用内转塔比较适合。

5 结 语

随着海上油气田的大开发, FPSO 由于在中深度海域和边际油田的开采中具有独特的优势。随着 FPSO 作业水深的增加和作业环境的变化, 对 FPSO 系泊系统的要求越来越高。深入研究未来 FPSO 系泊系统的适应性和可靠性变得越来越重要。

Design Consideration for Mooring System of FPSO

LV Li-gong, JING Yong, WEN Bao-gui, LIU Zhen-guo
(Production & Service Co.,CNOOC Oil Base Group Ltd.)

Abstract

Mooring system, which has high-tech technology, is a key part of FPSO system. The style of mooring is different according to environment and operation requirements. But Single Point Mooring System(SPM) is used mostly and normally.

In this paper, mooring system of FPSO is introduced firstly, and all sorts of SPM mooring system which has been used widely are introduced mainly. Additionally, the design key points are put forward and discussed combined with practice as the most important parts of this paper. Finally, FPSO mooring systems in China Sea are introduced briefly.

Key words: mooring system of FPSO; single point mooring system; spread mooring system; dynamic positioning ; design of mooring system

FPSO系泊系统设计上的考虑

作者: [吕立功](#), [景勇](#), [温宝贵](#), [刘振国](#), [LV Li-gong](#), [JING Yong](#), [WEN Bao-gui](#), [LIU Zhen-guo](#)

作者单位: [中海石油基地集团采油服务公司](#)

刊名: [中国造船](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [SHIPBUILDING OF CHINA](#)

年, 卷(期): 2005, 46(z1)

引用次数: 1次

相似文献(2条)

1. 会议论文 [吕立功](#). [景勇](#). [温宝贵](#). [刘振国](#) FPSO系泊系统设计上的考虑 2005

本文作为具有高科技含量的系泊系统, 是FPSO(浮式生产储/卸系统)的关键组成部分. 根据不同的环境条件和作业要求, 其系泊方式也是不同的. 其中单点系泊系统(SinglePointMooringSystem, 简称SPM)用的最多、最普遍. 本文从介绍FPSO系泊系统入手, 对目前应用较为广泛的几类系泊方式进行了较为详细的介绍. 然后结合实际, 重点对FPSO单点系泊系统在设计上需要考虑的内容进行了分析. 最后对中国海域FPSO系泊系统的应用进行了简单的介绍.

2. 学位论文 [胡楠](#) FPSO单锚摇臂系泊系统的非线性动力特性研究 2006

实验和研究工作表明, FPSO系泊系统恢复刚度为分段线性特性. 油轮在实际使用中会遭遇各种波浪频率的波浪作用, 导致油轮的运动的状态发生突变, 引起系泊载荷发生瞬时大幅的增加, 从而导致系泊索被破坏行为的发生. 本文考虑FPSO单点系泊系统分段线性特性建立控制方程, 研究系统的固有动力学特性及波浪作用下的运动响应, 揭示系泊系统运动的动力特性, 为FPSO系泊系统的系泊载荷的确定奠定理论基础. 本文综述了FPSO系统的发展现状、系统组成及研究进展. 利用经验公式求得波浪载荷幅值, 采用ALP公司的SYS系统为模型原型, 通过实验得到单点系泊系统的恢复力与位移关系曲线, 并将实验曲线分段线性化, 得到分段恢复刚度 $k<1<-18t/m$, $k<2>=33.8t/m$. 考虑分段恢复刚度及油轮纵荡, 建立单点系泊系统的运动方程. 分析了单点系泊-25万吨油轮系统的固有运动特性, 得到系统的运动周期为529.96s; 考虑不同的波浪参数, 计算了系泊油轮的纵荡运动响应并进行了稳定性分析, 得到了不同分段恢复刚度比的无阻尼幅频响应曲线及有阻尼幅频响应曲线. 计算分析表明, 当恢复刚度 $k<1>=k<2>$ 时, 分段线性系泊系统的运动特性与为线性结构系统相同; 当系泊系统两段恢复刚度的比值减小时, 系泊系统油轮纵荡运动的幅值出现跳跃现象, 在随机波浪作用下, 系泊油轮的运动可能从小幅运动突变为大幅运动, 系泊结构因此受到冲击载荷. 波浪频率与系统固有频率比 $\Omega=1$ 时, 系统产生主共振响应; 当 $\Omega=3$ 时, 系泊系统产生1/2亚谱共振响应; 当 $\Omega=4$ 时, 系泊系统产生1/3亚谱共振响应; 当 $\Omega=5$ 时, 系统产生1/4亚谱共振响应. 这表明在高海情下的系泊系统会出现亚谱共振.

引证文献(1条)

1. [薛士辉](#). [李怀亮](#). [胡雪峰](#) 内转塔式单点系泊系统及安装工艺介绍[期刊论文]-[中国造船](#) 2008(z2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgzc2005z1054.aspx

下载时间: 2010年3月1日