

FPSO 单点系泊系统安装及回接技术

梁 稷¹, 韦 卓², 余国核², 任 翔², 逯晶晶²

(1. 深圳中海油服深水技术有限公司, 广东 深圳 518067;

2. 中海油服物探水下技术作业公司, 天津 300451)

摘要: 单点系泊系统作为浮式生产储油卸油装置 (Floating Production Storage and Offloading, FPSO) 的核心组成部分, 需在 FPSO 进入安装现场之前完成安装, 随后 FPSO 进入安装现场进行回接。以我国南海某具体工程项目为背景, 全面、系统地介绍 FPSO 悬链腿单点系泊系统的安装及回接方法, 并采用 OrcaFlex 分析软件对各个施工步骤进行相关的模拟分析。该单点系泊系统的整个安装过程可分为抓地锚安装、下段锚腿铺设、锚腿张紧、上段锚腿铺设、单点浮筒拖航及就位和锚系回接单点浮筒等 6 个阶段。

关键词: 浮式生产储油卸油装置; 单点系泊系统; 安装及回接; OrcaFlex; 动态分析

中图分类号: U674.38; TE54

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 02-0018-06

Installation and Hook-up Technology for FPSO Single Point Mooring System

LIANG Ji¹, WEI Zhuo², YU Guo-he², REN Xiang², LU Jing-jing²

(1. Shenzhen COSL Deepwater Technology Co., Ltd., Shenzhen 518067, China;

2. Subsea Tech Operating Company, Geophysical COSL, Tianjin 300451, China)

Abstract: Single Point Mooring (SPM) system is one of the core components of FPSO (Floating Production Storage and Offloading) facility, which should be installed before FPSO is towed into the field for subsequent hook-up. This paper systematically introduces the installation and hook-up methods of a SPM system for a specific project at the South China Sea, where OrcaFlex software is used for the simulation and analysis of each operation stage. The installation process of the SPM system consists of 6 stages, i.e. deployment of anchor, laying the lower part of anchor leg, preload of anchor leg, laying the upper part of anchor leg, towing and positioning of the single point buoy, and the hook-up between the mooring system and the single point buoy.

Key words: FPSO; Single Point Mooring system; installation and hook-up; OrcaFlex; dynamic analysis

0 引言

当前海上浮式生产储油卸油装置 (Floating Production Storage and Offloading, FPSO) 主要采用单点-转塔系泊系统 (Turret Mooring)^[1-2]、多点-伸展系泊系统 (Spread Mooring) 及动力定位系统 (Dynamic Positioning) 等 3 种系泊系统, 并以单点系泊 (Single Point Mooring, SPM) 系统的应用最为普遍。单点系泊系统的应用使得 FPSO 具有风向标的效应, 使 FPSO 在各种风浪流作用下的受力最小, 从而保证其能在海上长时间连续工作。在海况良好的情况下 (即没有风向效应影响), 或在具有高度定向性的环境下, FPSO

收稿日期: 2016-11-28

作者简介: 梁稷, 男, 工程师, 1984 年生。2007 年毕业于大连理工大学工程力学专业, 现从事海洋工程工作。

可采用多点系泊的方式。

单点系泊系统主要由单点浮筒、锚腿（通常由多段锚链及锚缆组成）和锚点（抓力锚或吸力锚等）组成（见图1）。这里以我国南海某成功实施的具体工程为例，分别从锚点安装、锚腿铺设及张紧、单点浮筒就位及回接等方面入手，系统地介绍一种典型FPSO单点系泊系统的安装方法^[3]，并采用OrcaFlex软件对安装过程进行模拟分析^[4]。

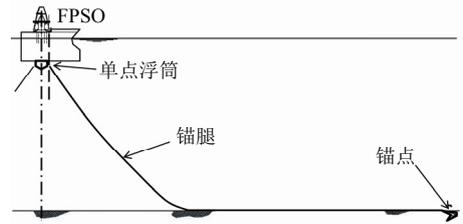


图1 FPSO 悬链腿单点系泊组成

1 工程基本信息

该工程的目标油田位于我国南海，作业水深约 140m。所采用的 FPSO 单点悬链腿系泊系统包含 8 根均匀分布的锚腿及 1 个静浮力约为 588kN 的单点浮筒，图 2 为锚腿与单点浮筒的分布情况。

单根锚腿包含有回接链、上锚缆、上锚链、调整链、配重链、下锚缆、下锚链和抓地锚，具体的组成及其规格见图 3。

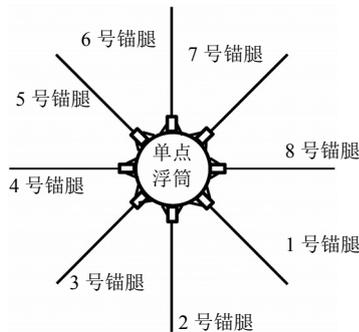


图2 锚腿与单点浮筒的分布情况

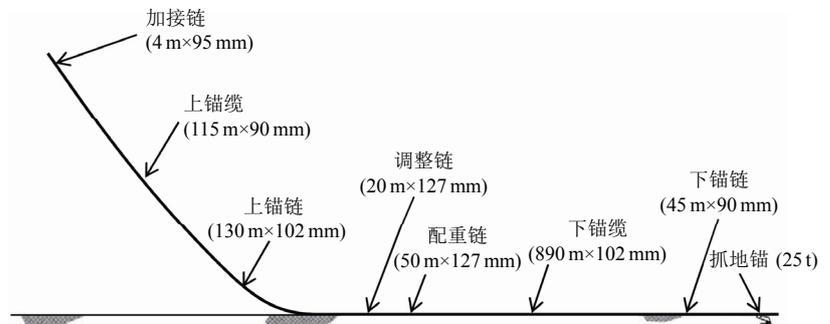


图3 单根锚腿的组成及其规格

在该项目中，单点系泊系统的安装过程分为以下 6 个阶段：

- 1) 抓地锚安装；
- 2) 下锚链、下锚缆及配重链铺设；
- 3) 锚腿张紧；
- 4) 调整链、上锚链、上锚缆及回接链铺设；
- 5) 单点浮筒拖航及就位；
- 6) 锚系回接及提拉。

2 抓地锚安装

该阶段要求将主作业船甲板上的抓地锚下放至海床，并确保锚的位置和方向正确。在此过程中，除了主作业船以外，还需要一艘辅助作业船（即拖船）协助作业，其中：主作业船装载有抓地锚及锚系其他组成部分；辅助作业船协助主作业船将抓地锚拖放至海床。该阶段需特别注意选择安全、合适的作业索具。图 4 为采用 OrcaFlex 软件模拟分析的抓地锚安装模型。在该模型中，需考虑使船尾间距满足安全作业要求，并使抓地锚模型尽量靠近着泥点，以确保包含锚腿的最大重量。模型中分别使用“6D”和“Line”单元模拟抓地锚、锚缆/链及索具，通过动态分析得到安装辅助索具的最大作用力，以确定索具的规格。

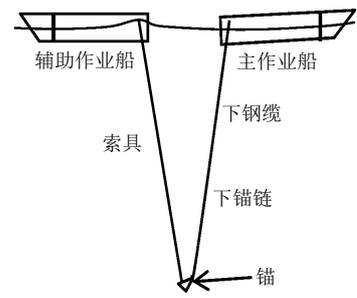


图4 抓地锚安装模型

3 下锚链、下锚缆及配重链铺设

在将抓地锚下放至海床后，由水下机器人（Remote Operated Vehicle, ROV）观察锚的方向是否正确，若正确，则主作业船开始铺设锚链及锚缆。

1) 在铺设下锚链时，锚链从锚链舱内释放出来，并通过控制绞车进行下放；当绞车与锚链的连接点到达船尾时，起升船尾处的鲨鱼钳，临时固定锚链，解脱绞车钢绳，并将其连接至锚链前端接近绞车的位置处；在张紧绞车使锚链的作用力传递至绞车上之后回收鲨鱼钳，通过控制绞车继续下放锚链；如此一段一段地铺设，直到下锚链铺设完毕。

2) 在铺设下锚缆时，鲨鱼钳固定在锚链端，从卷筒上释放下锚缆，并将其连接至锚链端之后开始铺设下锚缆，由于下锚缆已预先存储在绞车的卷筒上，因此通过控制大绞车即可连续铺设下锚缆。铺设过程中，需通过控制着泥点与入水点的水平距离（Layback）确保此过程中出现的最小弯曲半径不小于锚缆最小安全弯曲半径，且抓地锚位置不存在向上的提拉力。

3) 在铺设配重链时，配重链下水通常需吊机或船尾 A 吊协助。

由于锚腿通常是由锚缆和锚链组合而成的，因此需采用 OrcaFlex 软件分别对各种状态进行分析，给出各种状态下合理的 Layback。图 5 为锚缆正常铺设分析模型。

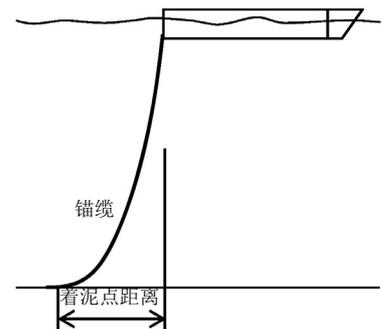


图 5 锚缆正常铺设分析模型

4 锚腿张紧

因拖曳埋置锚自身的结构特点，可将水平张紧力转化为垂向入泥力；在锚入泥一定深度之后，锚系在土壤阻力的作用下获得足够的抓地力。而拖曳埋置锚自身的作用力特点，要求张紧过程不能出现向上的提拉力。

锚腿张紧是锚系安装过程中非常重要的环节，为保证作业的可行性和安全性，需利用 OrcaFlex 软件进行模拟分析。在分析模型中，考虑以下环境参数：

- 1) 有义波高 $H_s = 3\text{m}$ （约为蒲氏风级 6 级）；
- 2) 海况使用 JONSWAP 谱；
- 3) 为确保覆盖给定海况下的最大响应，测试 4s, 6s 和 8s 等 3 个波浪周期；
- 4) 模拟周期为 1h；
- 5) 分析波浪角度为 $0^\circ \sim 180^\circ$ （船尾顶浪）。

采用 OrcaFlex 软件进行分析，给出锚链张紧时辅助链（或缆）的规格及长度，确保有足够的锚链留在海底，且锚上仅承受水平拉力；同时，给出满足锚最小测试张力要求的系柱拉力。抓地锚作用力示意图 6，锚系张紧模型见图 7。

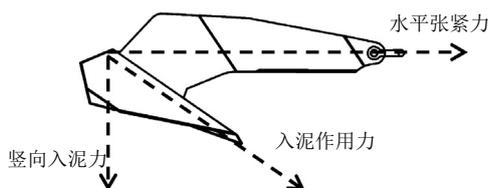


图 6 抓地锚作用力示意

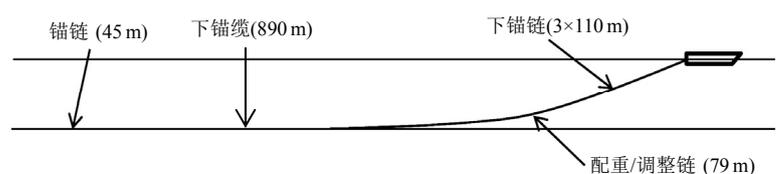


图 7 锚系张紧模型

5 调整链、上锚链、上锚缆及回接链铺设

在所有锚腿张紧完成之后, 需对抓地锚的最终位置进行确认, 以计算出调整链的长度; 此后, 开始铺设调整链、上锚链、上锚缆及回接链, 铺设过程与下锚链及下锚缆的铺设过程相同。铺设完成之后, 连接好索具及浮球, 方便 ROV 回收。

6 单点浮筒拖航及就位

当前应用较多的单点浮筒主要由 NOV, SBM 和 SOFEC 等公司生产, 通常重约 400t。因各公司生产的单点浮筒形式不同, 故推荐的安装方法也各有不同。这里介绍的安装方法仅适用于 SOFEC 公司生产的单点浮筒。

将单点浮筒从码头运至安装位置, 通常采用干拖和湿拖 2 种运输模式。

1) 干拖是指将码头上的单点浮筒吊装至驳船上, 再由驳船运输至安装现场, 并由大型起重船将其吊装下水;

2) 湿拖是指单点浮筒在码头由吊机直接吊装下水, 并由拖船拖航至安装现场。

以上 2 种方法各有优劣, 其中干拖的安全性更高、速度更快, 但需要在安装现场使用大型起重船, 会增加项目成本。因为该项目中没有大型起重船支持, 所以采用湿拖的方式进行单点浮筒的拖航。图 8 为单点浮筒拖航示意。

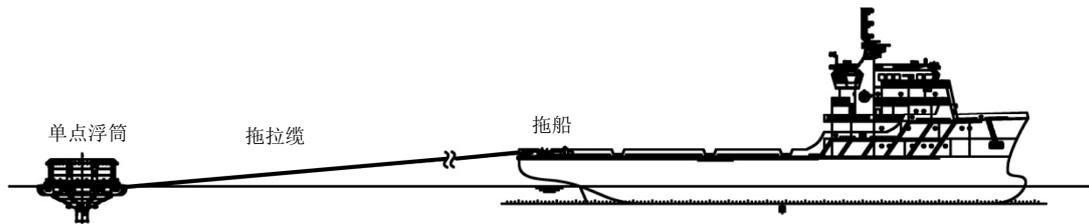


图 8 单点浮筒拖航示意

为配备可靠的拖航索具并验证单点浮筒在拖航过程中的安全性, 运用 OrcaFlex 软件及 AQWA 软件对拖航过程进行动态分析。在 OrcaFlex 软件中使用 6D 单元模拟单点浮筒, 并为其设置准确的浮筒水动力参数。该项目中单点浮筒的水动力参数通过 AQWA 软件分析获得。图 9 为单点浮筒 AWQA 模型, 图 10 为单点浮筒拖航 OrcaFlex 分析模型, 图 11 为极端环境假设, 表 1 为拖航过程中各索具所受最大拉力及浮筒最大倾角。

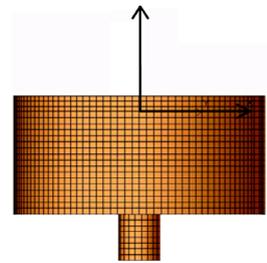


图 9 单点浮筒 AWQA 模型



图 10 单点浮筒拖航 OrcaFlex 分析模型

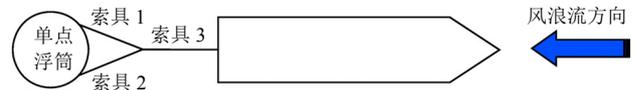


图 11 极端环境假设

表 1 拖航过程中各索具所受最大拉力及浮筒最大倾角

参数	波浪周期/s							
	5	6	7	8	9	10	11	12
索具 1 最大拉力/kN	121.7	119.8	119.8	120.5	121.6	122.6	123.4	124.1
索具 2 最大拉力/kN	121.7	119.8	119.8	120.5	121.6	122.6	123.4	124.1
索具 3 最大拉力/kN	244.2	240.6	240.7	242.6	244.8	246.9	248.3	250.1
浮筒最大倾角/(°)	12.1	12.3	11.8	11.0	10.3	9.7	9.2	8.4

7 锚系回接及提拉

在完成所有锚腿的铺设之后,需依次将其回接至单点浮筒上(见图12),并保证其不会与船舶推进器缠绕。在首次回接时,为确保作业船舶的安全,单点浮筒通常需由2艘拖船限位。系泊缆回接到浮筒上的设计条件是保持浮筒与船尾之间有10m的间距。在回接过程中,浮筒应尽可能地保持在中心位置处^[5]。为保证安装船舶推进系统时有更大的安装间隙,负责定位的拖船需将浮筒拖向需要进行连接的系泊缆处。在全部8根系泊缆回接初期,均假设浮筒能在定位拖船的作用下保持在安装中心位置处。根据环境条件,随着第一批4根系泊缆连接就位,定位拖船可相应地驶离,不再对浮筒进行限位。

由于每根锚腿回接过程中浮筒的位置、倾角及锚腿受力都不相同,因此需依次对8根锚腿的回接过程进行模拟分析,得到浮筒的最大倾角及每根锚腿的受力,以确保浮筒安全并为回接索具的选择提供指导。图13为第1根锚腿及全部锚腿完成首次回接的状态。为确保浮筒受力平衡,通常采用对角的顺序进行锚腿的回接及提拉。

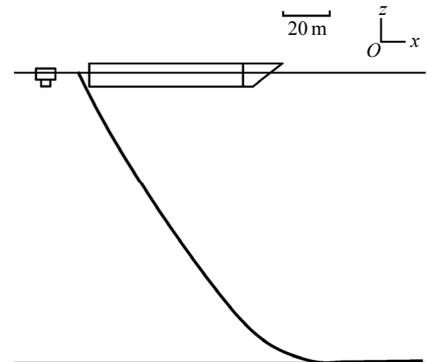
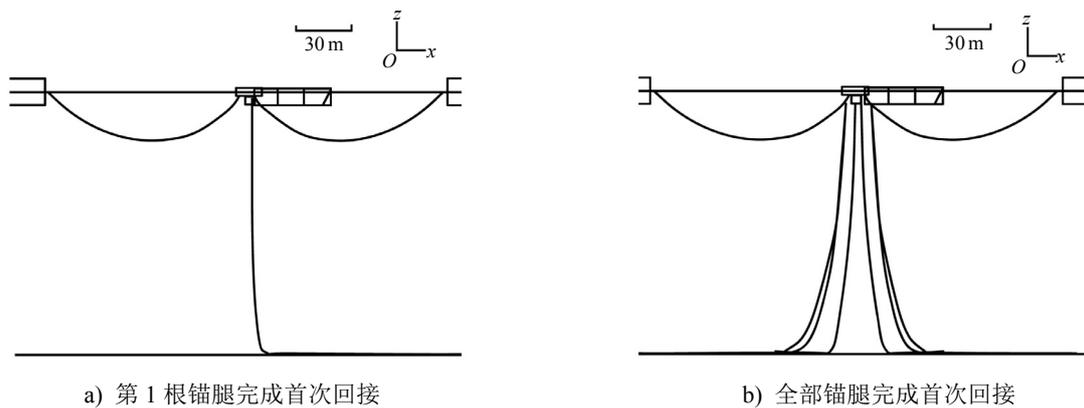


图12 锚系回接模型



a) 第1根锚腿完成首次回接

b) 全部锚腿完成首次回接

图13 第1根锚腿及全部锚腿完成首次回接的状态

在全部锚腿完成首次回接之后,开始进行提拉张紧。为使浮筒在提拉过程中尽可能地保持平衡状态(小倾角),同时考虑到主作业船吊机的拔高及吊重能力限制,通常采用分段提拉法进行提拉张紧,提拉的高度为15~20m,同样采用对角提拉的顺序。利用Orcaflex软件对回接和提拉的各个步骤进行静态分析,以确定浮筒的入水深度、浮筒旋转角度及回接荷载。图14~图16分别为第1次、第2次及第3次提拉过程中第8根系泊缆的提拉。

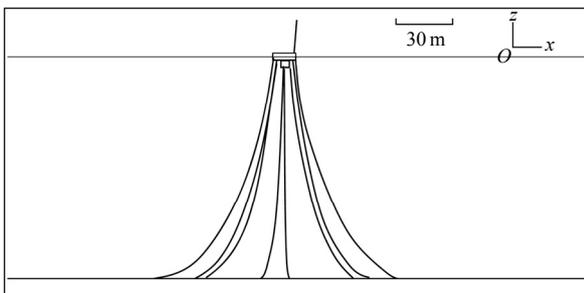


图14 第1次提拉过程中第8根系泊缆的提拉

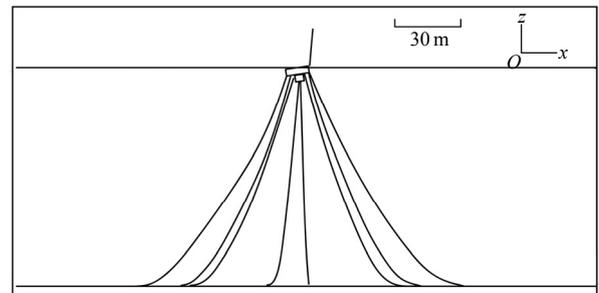


图15 第2次提拉过程中第8根系泊缆的提拉

随着回接的进行,浮筒逐渐潜入水中,浮力增大,提升力及提升时浮筒的倾角也逐渐增大。运用OrcaFlex

软件对此次提升进行分析, 所得结果为:

- 1) 第1次提拉过程中, 最大的提拉力约为75 kN, 最大的浮筒倾角为2.5°;
- 2) 第2次提拉过程中, 最大的提拉力约为171 kN, 最大的浮筒倾角为6.5°;
- 3) 第3次提拉过程中, 最大的提拉力约为425 kN, 最大的浮筒倾角为15.5°。

经过前3次提拉, 浮筒已接近最终的设计位置。最后一次提拉是微小的调整, 保证浮筒最终稳定在设计水深处, 并对各锚腿倾角进行测量记录。

经过以上施工步骤, 即完成 FPSO 单点系泊系统所有的安装工作, 最后由 ROV 进行完工调查录像。后续将移入 FPSO, 并将单点回接至 FPSO; 同时, 回接生产软管、动力电缆及控制脐带缆等柔性系统。

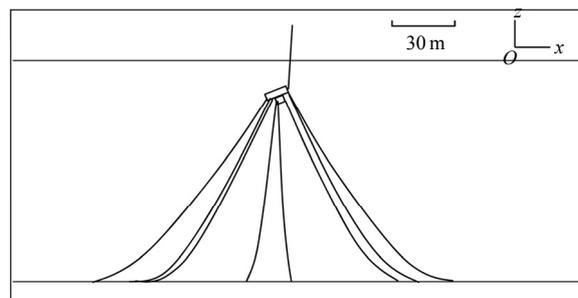


图 16 在第 3 次提拉过程中第 8 根系泊缆的提拉

8 结 语

当前, FPSO开发模式已成为一种较为成熟的海上油气田开发模式, 在我国南海得到了广泛应用。受限于我国南海的海况特点, 此处的FPSO几乎全部采用单点式锚泊系统。虽然国际上较为知名的单点系泊系统设计及制造厂家 (APL, SBM及SOFEC等) 生产的产品各有特点, 对安装的要求也各有不同, 但其主要的安装过程及可能存在的困难和风险是相似的。本文基于实际的南海工程项目, 全面、系统地介绍FPSO单点系泊系统的安装方法, 并采用OrcaFlex分析软件对安装的各阶段进行模拟分析。多年的实际应用结果证明, FPSO是一种较为适合我国南海深水油气田开发的模式, 相关经验总结可为类似的工程项目提供借鉴。

【参 考 文 献】

- [1] 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, 21 (5): 1-6.
- [2] 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[J]. 中国造船, 2008, 49 (S2): 243-250.
- [3] 房晓明. 文昌油田单点系泊系统海上安装[J]. 中国海上油气 (工程), 2003, 15 (1): 1-11.
- [4] CONNAIRE A, KAVANAG H K, AHILAN R V, et al. Integrated mooring & riser design: analysis methodology[R]. 1999: 1-13.
- [5] 胡雪峰, 林影炼, 陈捷俊, 等. FPSO 现场回接技术[J]. 中国造船, 2010, 51 (S2): 386-391.



版 权 声 明

为适应我国信息化建设, 扩大本刊及作者知识信息交流渠道, 本刊已被国内外文献索引、文摘、全文数据和出版网站收录, 凡投稿本刊的文章, 均视为同意本刊授权的合作媒体使用, 本刊支付的稿酬已包含授权费用。

本刊刊名船舶与海洋工程[®]具有商标注册证书, 亦受法律保护。未经许可, 不得冒用。

《船舶与海洋工程》编辑部