

# 圆筒型 FPSO 湿拖缆布置方案选型

徐勤宇<sup>1</sup>, 郭磊<sup>1</sup>, 李啟宝<sup>1</sup>, 曾红能<sup>2</sup>

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451; 2. 能威(天津)海洋工程技术有限公司, 天津 300392)

**摘要:** 本文以 Sevan 400 型 FPSO 为计算原型, 设计圆筒型 FPSO 湿拖过程中湿拖缆布置方案, 并进行了动态计算分析, 考虑迎流和顺流两个工况, 每个工况中波浪和风考虑间隔 45° 角的五个典型方向。相关计算结果表明, 按照设计的湿拖缆布置方案, 湿拖缆承受载荷满足设计要求。

**关键词:** 湿拖; FPSO; 动态分析

**中图分类号:** U698 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 04—0064—03

浮式生产储卸油装置(简称 FPSO), 它兼有生产、储油、卸油的功能, 一般与水下采油装置和穿梭油船组成一套完整的生产系统, 是目前海洋工程船舶中的高技术产品。近年来 FPSO 市场十分兴旺, 世界各大船厂都

纷纷加入到 FPSO 建造大军中, 竞争十分激烈。

按其设计结构形式, FPSO 可分为以圆筒型为代表的回转体型 FPSO 和普通船型 FPSO 两大类型。回转体型 FPSO 是相对新型的结构形式, 自 2005 年第一艘

二维设计中断面出图工作冗余重复的情况。Revit 剖面生成的堤身断面图如图 7 所示:

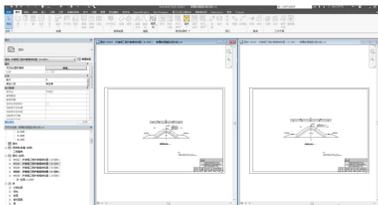


图 7 抛填堤坝结构 Revit 自动出图示意

## 3.6 工程量自动统计

传统典型断面法中, 分段工程量统计依据相应的典型断面设计方案进行统计, 统计方法是将各个断面中堤身的横断面积乘以分段里程长度, 这一方法统计的结果忽略了地形表面沿程的变化, 既无法实现工程量的精确统计, 又耗费了大量的人力成本。采用 BIM 运算式设计方法建立堤身后, 通过对各结构层的材质进行区别设置, 可以基于 Revit 实现各材料工程量的自动统计。同时, 由于 BIM 设计的堤身为三维实体, 其结构底部沿程处与自然表面相贴合, 故自动计算得到的方量值相比于传动的断面法来说更为精确。当模型因为结构改变或地形数据更新而产生变更时, 工程量会同步自动更新, 无需任何人为操作。

本文通过 Civil 3D、Revit 及其相应的可视化编程平台 Dynamo, 实现了堤坝结构的三维运算式设计。形成以 BIM 技术为核心的航道抛填堤坝结构 BIM 设计建模、整体稳定计算、出图及工程量统计一体化流程。将 BIM 技术中可视化编程的运算式设计理念引入到堤坝结构设计中, 不再采用近似的典型断面法, 而是直接采用基于实际地形的 BIM 结构设计方法完成堤坝结构的设计、分析及出图算量流程。同时各个设计环节的数据相互关联, 一变俱变, 切实提高了航道抛填堤坝结构的设计效率。

参考文献:

- [1] 王飞, 孙鹏等. 基于 Autodesk 的堤坝 BIM 模型构建与信息化框架开发与应用 [J], 水运工程, 2019 1: 150-155.
- [2] 李正, 李锐等. BIM 在堤坝工程设计中的应用 [J], 水运工程, 2019 11: 139-143.
- [3] 邢桂杰. BIM 技术在航道整治工程中的应用研究 [J], 工程技术, 2019 46 (16): 115-117.
- [4] 王鹏, 杨建东. BIM 技术在新九河段航道整治二期工程设计中的应用 [J], 水运工程, 2018 9: 21-24.
- [5] 袁立莎. BIM 技术在航道整治工程中的应用研究 [J], 港工技术, 2016, 53(4): 20-24.

## 4 结论

圆筒型 FPSO 投产以来,国内外设计了多种回转体圆筒型 FPSO,其中以挪威 Sevan Marine 公司设计的 SEVAN-FPSO 最受关注<sup>[1]</sup>。

本文分析所选择的 FPSO 是 Sevan 400 型 FPSO(见图 1),船体结构外形为圆筒型,作业水深约为 160 米,设计寿命 20 年。具有每天 3.5 万桶石油和 1.2 亿立方英尺天然气的设计处理能力,以及 40 万桶石油的存储能力。

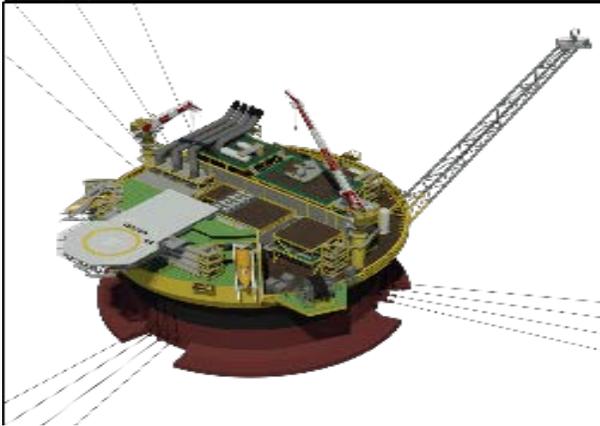


图 1 Sevan 400 FPSO

本文将研究该 FPSO 的短距离湿拖运输以及该 FPSO 在倾斜、压载等试验时在外锚地的临时待命工况,湿拖缆的布置方式选取是其中关键点,在设计环境条件下,湿拖缆承受载荷需满足设计要求。

## 1 模型建立

计算模型 FPSO 主尺度如表 1 所示:

表 1 FPSO 主尺度

描述	主尺度
舱底直径	87.5m
设计吃水直径	70.0m
主甲板直径	78.0m
主甲板型深	32.0m
最小吃水	15.3m
设计吃水	21.5m
最小吃水排水量	65540.0t
设计吃水排水量	89923.0t

FPSO 计算吃水 20.0m,对应排水量为 84029.6t,采用海洋工程行业应用广泛的 MOSES 软件进行 FPSO 湿拖的水动力分析和时域模拟<sup>[2]</sup>。水动力计算采用三维势流理论,MOSES 计算分析模型如图 2 所示。

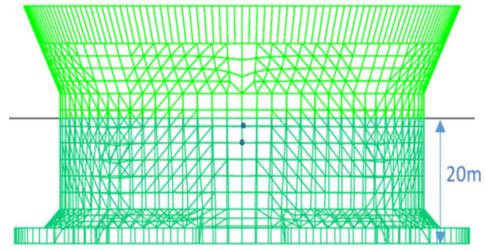


图 2 MOSES 计算模型

## 2 环境载荷

### 2.1 风载荷计算

由于 FPSO 在水线面以上的结构面积很大,因此风会产生较大的作用力,风载荷采用规范<sup>[3]</sup>中计算的公式求解。

$$F_w = wV^2kC_sC_hA10^{-3} \quad (1)$$

式中,  $W$ : 风压系数;  $V_k$ : 设计风速;  $C_s$ : 形状系数,见下表 2;  $C_h$ : 高度系数,见下表 2;  $A$ : 构件在迎风方向的投影面积。

表 2 构件形状系数及高度系数

构件描述	$C_s$	海拔高度 (m)	$C_h$
球形	0.40	0.00~15.30	1.00
圆柱	0.50	15.30~30.50	1.10
船体外壳	1.00	30.50~46.00	1.20
甲板室	1.00	46.00~61.00	1.30
孤立结构	1.50	61.00~76.00	1.37
钻井机架	1.25	76.00~91.50	1.43

### 2.2 流载荷计算

FPSO 计算吃水 20m,采用规范中计算的公式求解。

$$F_D = \frac{1}{2}V_{cz}^2\rho C_D A_D \quad (2)$$

式中,  $V_{cz}$ : 海流速度;  $\rho$ : 海水密度;  $C_D$ : 阻力系数;  $A_D$ : 单位长度构件在迎流向的投影面积;  $F_D$ : 单位长度结构物上海流力。

### 2.3 波浪载荷计算

FPSO 的波浪运动载荷使用不规则波计算,波浪谱采用 JONSWAP 谱,波浪谱密度公式如下。

$$S_J = \frac{5}{16}A_\gamma H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left(\frac{-5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) F \quad (3)$$

$$F = \gamma \exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right) \quad (4)$$

$$A_\gamma = 1 - 0.278 \ln(\gamma) \quad (5)$$

式中,

$H_s$ : 有义波高;

$\omega_p$ : 谱峰频率  $\omega_p = 2\pi/T_p$ ,  $T_p$  为谱峰周期;

$\gamma$ : 谱峰形状参数,本文计算取值 1.80;

$\sigma$ : 谱宽参数,取值如下:

$$\begin{cases} \sigma=0.07, \omega \leq \omega_p \\ \sigma=0.09, \omega > \omega_p \end{cases}$$

$\omega$ : 波浪圆频率。

### 3 湿拖动态分析结果

如图 3~ 图 5 所示, 设计三种湿拖缆布置方案, 辅拖缆夹角分别为 30 度、45 度和 60 度, 其中主拖缆为直径 76mm, 长 300m 的钢缆; 辅拖缆均为直径 76mm, 长 200m 的高强缆。为校核湿拖缆布置方案, 采用 MOSES 进行动态分析, 分析中考虑迎流和顺流两个工况, 每个工况中波浪力和风载荷考虑间隔 45° 角的五个典型方向, 详细工况及计算环境条件及参数如下表 3 所示。

表 3 计算环境条件及参数

工况	风速	流速	流向	有义波高	辅拖缆夹角
单位	(m/s)	(m/s)	(°)	(m)	(°)
Case1	13.88	1.00	0	1.40	30
Case2	13.88	1.00	180	1.40	30
Case3	13.88	1.00	0	1.40	45
Case4	13.88	1.00	180	1.40	45
Case5	13.88	1.00	0	1.40	60
Case6	13.88	1.00	180	1.40	60

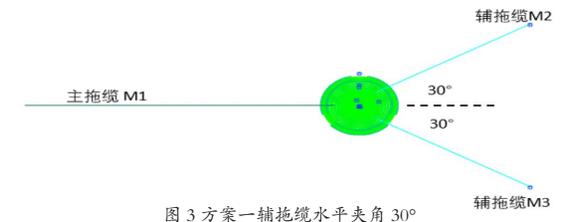


图 3 方案一辅拖缆水平夹角 30°

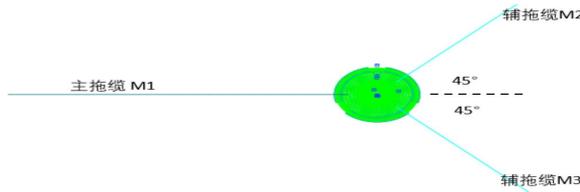


图 4 方案二辅拖缆水平夹角 45°

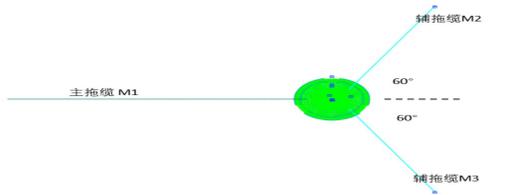


图 5 方案三辅拖缆水平夹角 60°

根据以上输入参数计算了各个工况对应 0° ~180° 共五个风、浪方向下湿拖缆张力的大小, 统计结果见下表所示。

根据动态分析结果, 采用方案一, 需要配备一艘 16000HP 和两艘 13000HP 的拖轮; 采用方案二, 需要配备一艘 13000HP 和两艘 16000HP 的拖轮; 采用方案三, 需要配备一艘 13000HP 和两艘 18000HP 的拖轮。

表 4 拖缆张力统计 0° ~180°

工况		0°	45°	90°	135°	180°
Case1	M1	115	148	151	90	18
	M2	0	87	123	88	28
	M3	0	0	0	0	0
Case2	M1	11	16	20	10	10
	M2	52	77	133	104	92
	M3	49	0	0	38	91
Case3	M1	115	128	123	78	17
	M2	0	76	108	91	26
	M3	0	0	0	0	0
Case4	M1	11	11	11	10	10
	M2	51	77	143	148	104
	M3	49	32	56	64	97
Case5	M1	115	122	114	50	17
	M2	0	74	109	70	19
	M3	0	0	0	0	0
Case6	M1	10	10	10	9	9
	M2	44	112	173	137	112
	M3	41	57	91	104	108

表 5 拖缆张力最大值统计

类别		方案一	方案二	方案三
拖缆	M1	151	128	122
	M2	123	148	173
	M3	91	97	108

### 4 结论

本文描述中对比了三种圆筒型 FPSO 湿拖缆布置方案, 并通过动态分析对三种方案的拖轮能力要求进行了研究。考虑短距离湿拖运输以及该 FPSO 在倾斜、压载等试验时在外锚地的临时待命需要将近一个月, 对大马力拖轮占用天数较多, 综合考虑拖轮选择的经济性并综合研究结果, 对于圆筒型 FPSO 湿拖方式, 建议选取方案一, 即辅拖缆 30° 夹角的布置方案。

#### 参考文献:

- [1] 赵治民, 李焱, 唐友刚, 等. 圆筒型 FPSO 优化设计与水动力性能分析 [J]. 海洋工程, 2020, 38(1):12-19.
- [2] 孙伟英, 梁学先, 樊之夏, 等. 典型张力腿平台湿拖分析 [J]. 中国造船, 2012, 53(A02):11.
- [3] American Bureau of Shipping, Rules for Building and Classification of Mobile Offshore Drilling Units[S], 2017.