

大型FPSO码头靠泊防台系泊方案研究

邹 勇

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要: 在台风频发的季节,对于大型FPSO而言,其在码头靠泊期间的系泊安全不仅关系着船舶和码头硬件设施的重要价值,更直接关系着船上和岸上人员的生命安全。因此,台风期间的防台系泊工作不仅是保障安全生产的关键环节,更是一项需要严谨对待、不容忽视的重要挑战。本文紧密围绕我司当前正在改装的30万吨级FPSO,结合我司现有的码头硬件设施,深入探索并优化了码头停靠期间的防台系泊方案,以确保FPSO和码头在台风季节的系泊安全。

关键词: FPSO; 码头系泊; 防台系泊

引言

浮式生产储油卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)是集石油开采、油气分离、油污水处理、动力发电、供热、原油储存和输送以及作业人员居住于一体的综合性大型海上石油生产基地。为了满足多样化的功能需求,通常在FPSO甲板区域配置多个上部模块。

一艘完整的30万吨级FPSO,其模块沿船横向的受风面积高达约8000m²,这一面积几乎等同于主船体侧面的受风面积。鉴于模块的巨大重量,FPSO的模块搭载工作通常只能在主船体系泊停靠在码头时进行。因此,在台风季节,面对如此庞大的受风面积,无论是业主还是船厂,都需将大型FPSO在码头靠泊期间的防台系泊工作视为安全生产的首要任务,同时也是一项不容忽视的重大挑战。这不仅关系到船舶和模块的安全,更直接关系到人员生命和财产的安全。

本文依托我司正在改装的30万吨级FPSO,基于我司现有的码头硬件资源,深入研究了码头停靠期间的防台系泊方案,以确保FPSO和码头在台风季节的系泊安全。

1 风、浪、流及风暴潮

1.1 风

码头区域处于长江入海口,夏季盛行东南风,冬季盛行西北风,属于受台风影响频繁的区域,具有来势猛、速度快、强度大、破坏力强的特点。台风出现在每年的6~10月,主要集中在7~9月三个月,约占全年的84%,风力≥8-9级占最多,风力≥10级也占有一定的比例^[1]。50年一遇风速约为33.8m/s,百年一遇风速约为37.4m/s^[2]。

1.2 浪

长江口海域以风浪为主,涌浪次之,其风浪常浪向为东北偏东(NNE)方向、频率为10.25%,次常浪向为

东南偏南(SSE)方向、出现频率为8.75%,涌浪主要出现在东北(NE)~(东南)SE方向之间。长兴岛位于长江口南港水道北侧,南港河段波浪以风浪为主,单纯的涌浪很少见。工程岸段波高一般在0.6m以下,波高大于1.0出现频率很低、仅在0.1%~0.2%左右。

经综合分析长兴岛南岸的水域条件和风浪资料,该区域的主要波浪方向为东南偏南(SSE)、东南(SE)、南(S)西南(SW)、西(W)和西北偏西(WNW)方向,按各方向的有效风区长度及重现期风速估算,同时考虑本项目船舶靠泊所在内档水域有限,最大有义波高取1.86m,进一步地,按照估算公式(1)得到谱峰周期 T_p 为6.19s。

$$T_p = ((13H_s)^{0.5} + (30H_s)^{0.5}) / 2 \quad (1)$$

1.3 流

根据厂区实测,码头区域最大潮流流速约1.7-2.0m/s。

1.4 风暴潮

长江口地区风暴潮绝大部分是由台风所引发,风暴潮增水十分明显,风暴潮增水在1.08~1.20m。除增水外,五十年一遇高水位约5.79m,五十年一遇低水位约-0.33m^[3]。

2 系泊计算模型

2.1 船舶主尺度及计算参数

船舶主尺度及计算参数见表1所示:

表1 船舶主尺度及计算参数

名称	数值	单位
总长	333.00	m
垂线间长	318.00	m
型宽	58.00	m
型深	31.25	m
排水量	107778.44	ton

续表:

名称	数值	单位
计算吃水	7.50	m
重心纵向位置	177.14	m
重心垂向位置	25.96	m
横摇回转半径	14.28	m
纵摇回转半径	61.70	m
艏摇回转半径	64.17	m

2.2 系泊系统计算参数

1) 系泊缆绳

本项目系泊设计中主要采用了直径46mm和72mm尺寸的超高分子量聚乙烯纤维缆 (HMPE) 系泊缆绳来进行系泊计算, 缆绳的相关性能参数如表2所示, 缆绳性能曲线见图1至图3。

表2 缆绳性能参数

直径	材质	线密度	破断载荷	截面积
mm	-	g/m	kN	mm ²
46	HMPE	1200	1000	1661.06
72	HMPE	2910	2000	4069.44
72	DNM	2910	3500	4069.44

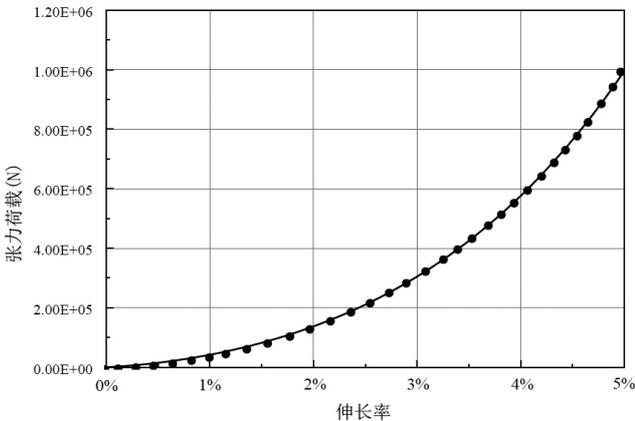


图1 46mm超高分子量聚乙烯 (HMPE) 纤维缆绳性能曲线

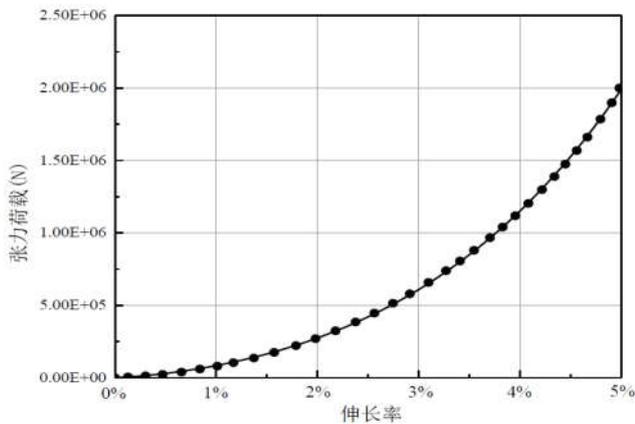


图2 72mm超高分子量聚乙烯 (HMPE) 纤维缆绳性能曲线

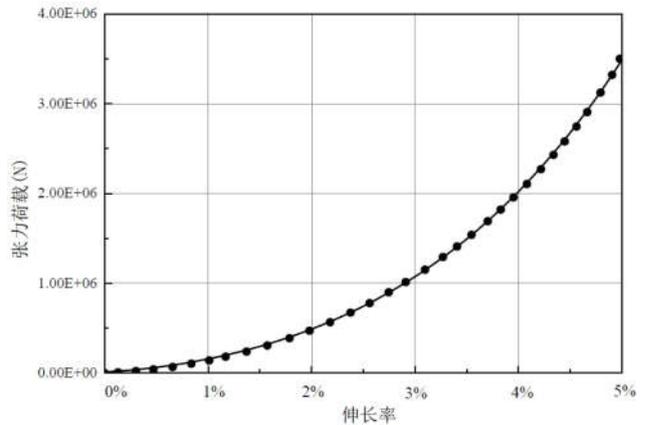


图3 72mm超高分子量聚乙烯 (DNM) 纤维缆绳性能曲线

2) 码头护舷

码头上安装有两个不同长度的H500-2.25m和H500-3.25m拱形橡胶护舷, 将其拟合为具有非线性刚度特性的两组护舷参数, 许用反力分别为776kN和1121kN。护舷的性能曲线分别如图4和图5所示。

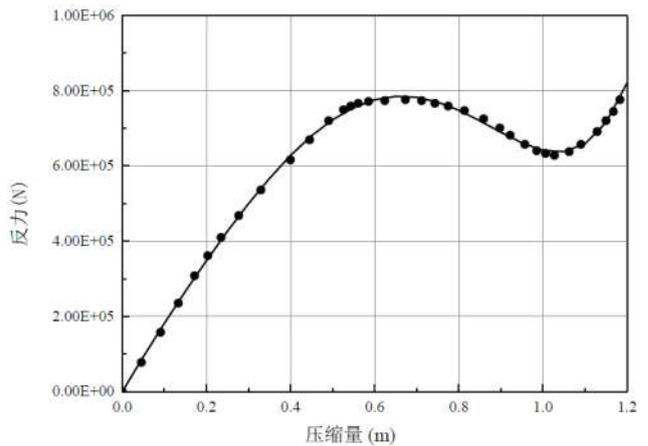


图4 H500-2.25m护舷性能曲线

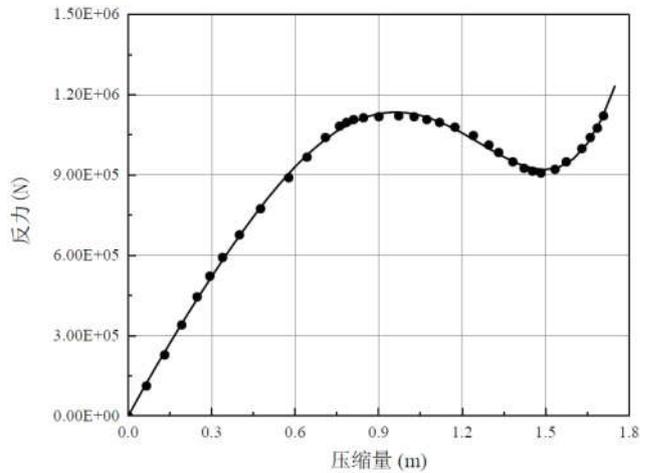


图5 H500-3.25m护舷性能曲线

2.3 系泊布置方案及计算模型

台风工况船体系泊布置如图6所示, 缆绳编号自船尾至船首方向, 以序号1开始。系泊计算中使用46mm缆绳8根, 72mm普通缆绳43根, 其中艏缆14根、倒缆10根、横缆17根、艮缆10根, 作为防台缆设计的72mmDNM缆绳4根, 全部缆绳数量共计55根, 码头总系泊长度423.80m, 系泊长度与船长比为1.33。

系泊计算采用ANSYS-AQWA软件进行时域内动力响应分析, 通过建立码头-船体系泊模型, 基于时域分析法进行风-浪-流不同环境参数组合下的系泊系统模拟。参考规范^[6]要求, 在时域分析中模拟3个小时计算时长, 通过数值仿真计算得到船体六自由度运动响应和系泊载荷。相应计算模型见图7所示, 图8及图9分别显示了艏部和艮部计算模型。

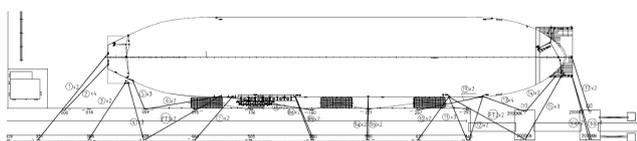


图6 台风工况船体系泊布置图

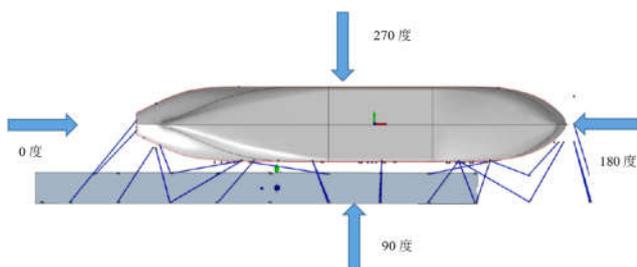


图7 系泊模型俯视图

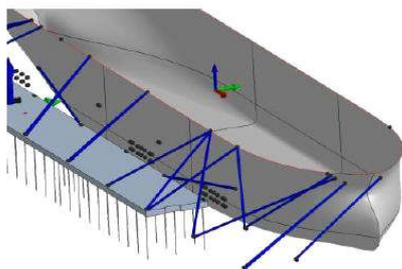


图8 艏缆系泊布置图

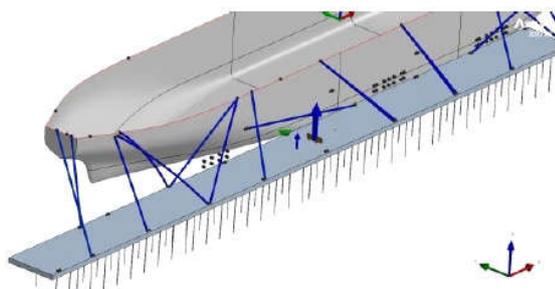


图9 艮缆系泊布置图

3 风、流载荷及组合计算工况

3.1 风载荷计算

计算风速取百年一遇风速, 风力计算基于船级社规范^[5]推荐, 计算公式见式(2):

$$F_{\text{wind}} = 0.0623A_w C_s C_h V^2 \quad \text{kgf/m}^2 \quad (2)$$

其中:

A_w —受风投影面积, m^2 ;

C_s —形状系数;

C_h —高度系数;

V —风速, m/s

考虑到台风季节只有部分模块搭载, FPSO主船体及已搭载模块实际受风面积如表3所示。

表3 主船体及模块受风面积

编号	名称	侧向受风面积	艏向受风面积
		m^2	m^2
1	主船体	8008	1410
2	上部模块	5891	1392

将主船体及模块受风载荷按照图7所示方向, 每间隔45度进行分解, 计算得到不同角度风载荷如表4所示:

表4 主船体及模块受风载荷分解

编号	风向角	侧向受风载荷	艏向受风载荷
	度	t	t
1	0	0	125.4
2	45	519.5	62.6
3	90	804.7	0
4	135	588.1	44.2
5	180	0	125.4
6	225	519.5	62.6
7	270	804.7	0
8	315	588.1	44.2

3.2 流载荷计算

流载荷计算参考了美国石油协会OCIMF (Oil Company International Marine Forum)^[4]对大型油船风流作用下的模型试验数据结果, 结合FPSO船体相关尺度和工况特点, 计算得到船体所受流载荷值, 计算公式见式(3)及式(4):

$$F_{xc} = 1/2 C_{xc} \rho_c V^2 L_{BP} d \quad (3)$$

$$F_{yc} = 1/2 C_{yc} \rho_c V^2 L_{BP} d \quad (4)$$

式中:

C_{xc} : 纵向流力系数;

C_{yc} : 横向流力系数;

ρ_c : 水密度, 1025kg/m^3 ;

V : 流速, 2m/s ;

L_{BP} : 垂线间长, m ;

d: 平均吃水, m;

由于FPSO沿江顺流布置, 因此计算流载荷方向为沿船长方向, 流载荷计算结果见表5。

表5 流载荷计算

流向	F_{xc}	F_{yc}
度	t	t
0/180	18.3	-
90/270	-	0

3.3 组合计算工况

根据FPSO所在位置的风、浪、流情况进行组合, 得到表6所示16个工况:

4 结算结果

4.1 缆绳受力计算结果

在防台工况下对FPSO的缆绳载荷进行计算, 并对不同工况下的缆绳最小安全系数进行统计。缆绳的载荷及安全系数统计情况如表7所示, 从表中可以看出, 各缆绳安全系数值均大于2.00, 满足规范要求。其中在工况11缆8b所受载荷为97.75t, 安全系数接近于2.00, 在系泊布置中需要尤为注意。

表6 组合计算工况

工况	浪向	波高	周期	风载荷方向	流载荷方向
	度	m	s	度	度
1	0	1.86	6.19	0	0
2	45	1.86	6.19	45	0
3	90	1.86	6.19	90	0
4	135	1.86	6.19	135	0
5	180	0.746	3.92	180	0
6	225	0.519	3.27	225	0
7	270	0.524	3.29	270	0
8	315	0.856	4.20	315	0
9	0	1.86	6.19	0	180
10	45	1.86	6.19	45	180
11	90	1.86	6.19	90	180
12	135	1.86	6.19	135	180
13	180	0.746	3.92	180	180
14	225	0.519	3.27	225	180
15	270	0.524	3.29	270	180
16	315	0.856	4.20	315	180

表7 典型工况缆绳载荷统计 (单位: t)

工况 缆绳	1	2	3	4	……	13	14	15	16	最大载荷	破断载荷	安全系数
1	7.89	26.74	29.33	15.14	……	2.44	0.97	1.94	5.17	29.33	101.9	3.48
2	7.32	34.51	41.52	15.84	……	0.23	0.06	0.12	3.10	41.52	101.94	2.46
3	8.95	59.99	78.25	28.66	……	0.52	0.15	0.19	2.86	78.25	203.87	2.61
4	0.11	41.53	66.03	20.54	……	0.25	0.09	0.08	0.09	66.84	203.87	3.05
5	0.11	18.71	48.24	6.42	……	0.04	0.11	0.13	0.12	50.05	203.87	4.07
6	12.44	5.08	6.07	2.95	……	0.16	0.16	0.23	3.74	12.44	203.87	16.39
7	11.83	36.92	64.72	22.18	……	0.21	0.11	0.14	2.43	64.72	203.87	3.15
8a	0.16	34.28	88.75	34.49	……	3.07	0.14	0.08	0.08	92.27	203.87	2.21
8b	0.20	37.68	93.78	38.33	……	4.79	0.22	0.10	0.09	97.75	203.87	2.08
9a	0.69	31.31	93.16	37.24	……	0.27	0.08	0.06	0.08	93.16	203.87	2.19
9b	0.7	32.34	95.56	38.84	……	0.42	0.09	0.07	0.08	95.56	203.87	2.13
10	10.35	20.65	54.42	26.67	……	0.17	0.13	0.12	1.12	54.42	203.87	3.75
11	0.12	15.91	60.01	33.36	……	1.55	0.20	0.08	0.07	64.15	203.87	3.18
12	3.86	20.49	70.89	37.20	……	0.16	0.11	0.08	0.13	70.89	203.87	2.88
13	0.52	10.12	40.36	21.68	……	24.46	11.04	0.71	2.07	45.26	203.87	4.50
14	6.33	8.02	26.58	15.12	……	0.09	0.28	0.38	0.11	26.58	101.94	3.84
15	4.42	10.02	36.34	23.61	……	0.23	0.05	0.09	0.11	36.34	203.87	5.61
16a	3.52	22.14	79.34	60.82	……	8.18	5.76	0.96	0.12	80.15	203.87	2.54
16b	1.18	15.76	63.76	48.31	……	4.91	3.01	0.24	0.11	64.50	203.87	3.16
17	1.86	21.95	89.71	67.58	……	6.95	5.71	1.13	0.39	90.22	203.87	2.26
18	0.51	12.23	17.75	14.73	……	18.97	14.83	8.71	1.59	21.78	203.87	9.36
19	14.99	4.31	7.62	3.43	……	0.10	0.11	0.17	3.61	14.99	203.87	13.60
20	0.10	24.60	67.26	16.29	……	0.07	0.05	0.05	0.06	67.26	203.87	3.03

续表:

工况 缆绳	1	2	3	4	……	13	14	15	16	最大载荷	破断载荷	安全系数
FT1	8.34	12.84	21.05	5.53	……	0.16	0.14	0.17	0.80	21.05	356.78	16.95
FT2	0.58	10.43	31.58	22.28	……	13.27	7.28	1.09	0.09	34.73	356.78	10.27

4.2 带缆桩受力计算结果

本节在防台工况下对FPSO的码头带缆桩承载情况进行计算,并统计不同角度下各带缆桩的载荷大小。码头上带缆桩的载荷统计情况如表8所示,从表中可以看

出,参与系泊计算的25个缆桩均满足承载要求。其中在风吹离码头时428A号桩承载为200.53t,590A号桩承载为201.78t,承载较其他带缆桩更大,在系泊布置中需要重点注意。

表8 码头带缆桩载荷统计

带缆桩名称	工况	风向	流向	所受载荷	承载能力
		度	度	t	t
1A	11	90	180	181.04	204.08
1B	3	90	0	53.16	204.08
2A	11	90	180	69.46	204.08
2B	3	90	0	109.01	204.08
3A	11	90	180	180.43	204.08
4A	11	90	180	160.29	204.08
4B	11	90	180	64.50	204.08
000B	3	90	0	166.09	204.08
059A	3	90	0	150.14	204.08
059B	1	0	0	24.87	204.08
180A	12	135	180	43.57	204.08
257B	1	0	0	29.99	204.08
351A	3	90	0	58.66	204.08
388A	3	90	0	156.49	204.08
428A	11	90	180	200.53	204.08
428B	3	90	0	42.09	204.08
464B	3	90	0	129.43	204.08
550A	11	90	180	184.55	204.08
550B	11	90	180	195.89	204.08
590A	3	90	0	201.78	204.08
590B	3	90	0	186.32	204.08
627A	3	90	0	191.12	204.08
663A	11	90	180	108.83	204.08
663B	3	90	0	192.46	204.08

5 结论及注意事项

本文通过系泊计算对30万吨级FPSO在码头系泊情况下的防台受力情况进行了分析,计算结果表面,系泊方案满足实际工程需要,由于防台系泊的特殊性及重要性,笔者结合自身经验,提出如下注意事项供系泊防台研究者参考。

(1) 系泊计算时由于FPSO上部模块未完全安装,上部模块侧向受风面积仅考虑了4000m²,还有约5000m²未

纳入计算考虑中,本系泊方案缆绳和缆桩几乎已经达到了最大利用率,在此基础上,若考虑模块全装后FPSO的防台系泊需要继续增加缆绳或者缆桩,码头缆桩属于码头基础设施,增加的可能性不大,因此需要结合厂内硬件和工程实际进行备用方案的进一步研究。

(2) FPSO的模块大多为桁架结构,根据规范^[5],桁架结构沿风向有2个截面受风载荷,则受风面积按照满度考虑为2×0.3,但模块往往有很多设备,同时一般FPSO

模块沿船宽方向布置数量可能是2个或者多个,有的FPSO进行了风洞试验可以很好的得到风阻系数,但更多的FPSO没有风洞试验数据,这给FPSO受风载荷的计算带来了许多困难和不确定因素。

(3) 台风来临时往往伴随着风暴潮,风暴潮带来最明显的影响是水位的上升,本文中风暴潮增水达到1.08-1.2m,若同时考虑波浪和增水效应,码头与FPSO之间的方驳若吃水不够,方驳很有可能被潮水及波浪的联合作用冲至岸上,而码头与FPSO之间少了方驳之后,FPSO附属结构很可能直接撞击码头,从而造成码头或者FPSO自身产生不可估量的损失,本方案中对方驳进行了压载从而确保方驳有足够的吃水应对最不利情况,同时在条件满足的情况下可增加FPSO的压水量,以减少受风面积。

(4) 限于篇幅,本文只列举了高潮位时系泊方案的研究结果,实际使用中,当台风来临时,根据潮位调整缆绳受力几乎不可能,因此同一系泊方案高、低潮位时的缆绳及缆桩受力分布都需要进行计算研究,确保FPSO和码头无论在高潮位还是低潮位的受力都处于安全可控

状态。

(5) 根据规范^[6],应该考虑缆绳破断一根的情况,实际计算时,对缆绳破断一根工况进行了考虑,限于篇幅,本文不再展开描述。

参考文献

[1]黄世成,周嘉陵,任健,陈兵,程婷.长江下游百年一遇的极值风速分布.应用气象学报.2009年8月,第20卷4期.

[2]秦尧,施正礼,姚怡芝.浮船坞锚泊系统设计.船舶设计通讯,2016年4月,增刊1(总第145期).

[3]查苏,张圩,中海浦东浮船坞移坞工程可行性研究报告,2018.12.

[4]OCIMF.Prediction of Wind and Current Loads On VLCCs (2nd edition) [Z].London: Witherby&Co,ltd,1994.

[5]RULES FOR BUILDING AND CLASSING FLOATING PRODUCTION INSTALLATIONS,ABS, 2023.01.

[6]BV NR49,3Classification of mooring systems for permanent offshore units