

文章编号:1005-9865(2017)02-0027-07

圆筒型浮式生产储油平台稳性研究分析

张会良^{1,2}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200032; 2. 南通中远船务工程有限公司, 江苏 南通 226006)

摘 要:针对圆筒型浮式生产储油平台, 对其静稳性曲线做了分析研究, 得到了圆筒型 FPSO 的稳性特点。根据平台实际作业情况, 建立了一系列的典型装载工况, 分别按照 DNV 和 MARPOL 公约稳性衡准的要求, 对这些典型工况进行校核, 同时得到满足稳性要求的许用重心高度曲线, 给平台操作者提供了参考。经过计算, 验证了圆筒型 FPSO 能同时满足 DNV 和 MARPOL 公约的稳性要求。最后对影响圆筒型 FPSO 稳性的主要因素做了分析研究, 得到主要影响因素有主船体外形尺寸、装载工况、进水点位置、舱室划分与布置以及风倾力矩等。

关键词:圆筒型 FPSO; 静稳性曲线; 装载工况; 许用重心高度

中图分类号:P751 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2017.02.005

Stability research and analysis for cylindrical floating production storage and offloading unit

ZHANG Huiliang^{1,2}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200032, China; 2. Nantong COSCO Shipyard Co. Ltd., Nantong 226006, China)

Abstract: As the cylindrical FPSO being constructed by COSCO shipyard, righting lever curve of the unit is studied and stability character of such cylindrical FPSO is obtained. On the basis of FPSO actual operational conditions, a series of typical loading conditions are set up. Then according to the stability requirements of DNV and MARPOL regulations, stability check of such typical loading conditions is carried out. And the curve of allowable VCG height is calculated to provide reference for FPSO operators. It is concluded that cylindrical FPSO can meet the stability requirements of both DNV and MARPOL regulations after calculation. Main influencing factors on stability of cylindrical FPSO are also researched, and the influencing factors are the main hull dimensions, loading conditions, flooding point positions, tank division and arrangement and wind heeling lever, etc.

Keywords: cylindrical FPSO; righting lever curve; loading condition; allowable VCG height

海上浮式生产储油平台 (Floating Production Storage and Offloading, 简称 FPSO) 被称为“海上油气加工厂”。它是兼油气生产处理、原油储存外输、生活及动力供应于一体的大型海上石油生产基地。为了保证 FPSO 在海上安全、稳定地作业, 防止海损事故发生后对周围海洋环境造成污染, FPSO 在设计时必须满足有关规范的稳性要求^[1]。针对一艘圆筒型 FPSO, 对其各种工况的完整稳性和破舱稳性进行了分析研究, 得到此类特殊形状 FPSO 的稳性特点。

1 圆筒型 FPSO 简介

该圆筒型 FPSO 采用了挪威 Sevan Marine 公司的基本设计, 服役于英国北海区域, 由中远船务 (启东) 海

收稿日期: 2015-10-23

作者简介: 张会良 (1984-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 助理工程师, 从事船舶与海洋工程总体设计工作。E-mail: 185176669@qq.com

洋工程有限公司承担详细设计和生产承建,并且负责设备采购、模块建造及安装、总装搭载、调试试验以及海上运输等。FPSO 主船体直径为 70 m,型深 32 m,生产甲板高 38 m,设计吃水 22 m,储油能力 40 万桶,采用 12 点分布式系泊系统。生产甲板上主要布置有清管模块、分离模块、压缩模块、注水模块、动力模块、生活区模块、办公区模块及功能单元模块等。图 1 为该圆筒型 FPSO 三维模型的侧视效果。

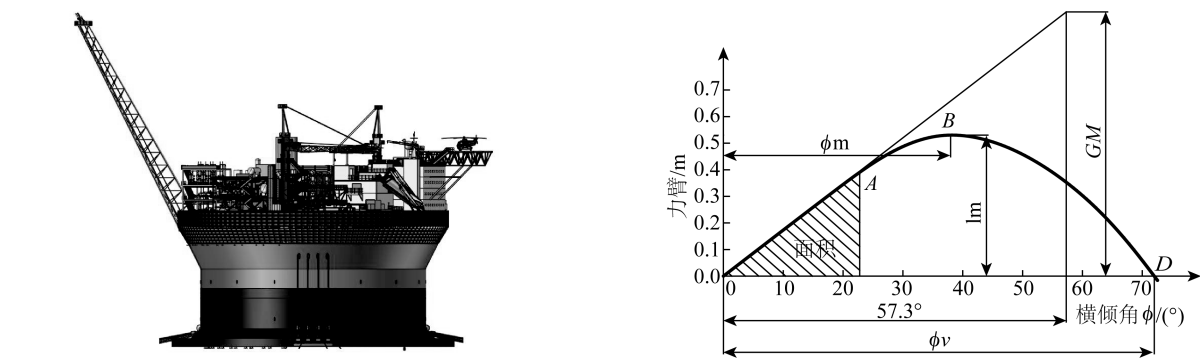


图 1 圆筒型 FPSO 效果图

Fig. 1 3D model of cylindrical FPSO

图 2 静稳性曲线

Fig. 2 Righting lever curve

2 圆筒型 FPSO 的稳性特点

常规 FPSO 的外形类似于油船,或者直接由大型油轮改造而成。而圆筒型 FPSO 最大的特点是其主船体是圆筒形状的,这种特殊的外形直接决定了该 FPSO 作业时的稳性特点。评价平台稳性的好坏可以通过静稳性曲线来判断。图 2 为海洋平台的静稳性曲线图。其中典型的特征值包含:在 原点处的斜率即 GM 值、最大复原力臂及其对应的横倾角,稳性消失角和静稳性曲线下的面积等。下面分别对初稳性高 GM 以及静稳性曲线 GZ 进行分析研究。

2.1 初稳性高 GM 的特点

初稳性高 $GM=KB+BM-KG$,其中 KB 为浮心高度, BM 为初稳心半径, KG 为重心高度^[2]。首先通过比较标准圆筒和标准长方体的初稳心半径 BM 的大小,来说明圆筒形状的特点。假设标准圆筒浮体直径为 D ,长方体浮体长度为 L ,宽度为 B 。令两浮体水线面面积相等,即 $(\pi D^2)/4 = L \times B$,因此同样吃水下两浮体排水体积也相同。初稳心半径 $BM = I_T/\nabla$,其中 I_T 为水线面对中心轴的横向惯性矩, ∇ 为水线以下的排水体积。圆形和长方形水线面的横向惯性矩分别为 $(\pi D^4)/64$ 和 $(LB^3)/12$,将 $(\pi D^2)/4 = L \times B$ 代入 $(\pi D^4)/64$,得圆形水线面横向惯性矩为 $(L^2 B^2)/(4\pi)$ 。若令长方体初稳心半径 $BM=1$ (无量纲),则对于不同的 L/B ,两种形状的 BM 对比如表 1 所示。从表中可以看出,对于具有相同水线面面积的圆筒和长方体浮体,当 $L/B>1.05$ 时,圆筒型 BM 值就会大于长方体,且随着 L/B 值的增大, BM 的比值也越来越大。船型 FPSO 的 L/B 一般在 5~6 之间,这说明圆筒型 FPSO 能够更充分地利用其水线面面积来提高稳性性能。

表 1 圆筒型和长方体初稳性半径 BM 对比

Tab. 1 BM comparison between cylindrical and cuboid body

形状	$L/B=1$	$L/B=1.05$	$L/B=2$	$L/B=3$	$L/B=4$	$L/B=5$	$L/B=6$
长方体 BM	1	1	1	1	1	1	1
圆筒型 BM	0.95	1	1.91	2.86	3.82	4.77	5.73

以上只是通过比较标准圆筒和长方体的 BM 值来说明圆筒型浮体的优势,但船型 FPSO 不是标准的长方体,水线面面积从底部向上越来越大。因此,同样规格的船型 FPSO 在最大吃水处的水线面面积要比标准圆筒大。而且初稳性高 GM 还与浮心高度 KB 、装载工况重心高度 KG 相关,所以仍需要与同规格的船型 FPSO 进行进一步的对比研究。参考在役 FPSO 的主尺度,构造出与此圆筒型 FPSO 相近排水量和载重量的船型 FPSO,满载吃水下的对比结果如表 2 所示。从表中可以看出,近似规格的圆筒型 FPSO 有着更大的初稳性高 GM 。

表 2 近似规格的圆筒型和常规船型 FPSO 对比

Tab. 2 Comparison between cylindrical and ship-type FPSO of similar sizes

形状	L_{pp}/m	B/m	D/m	d/m	Δ/t	BM/m	KB/m	KM/m	KG/m	GM/m
圆筒型	70	70	32	22	92 000	13.2	10.4	23.6	18.9	4.7
船型	210	36	21	13.5	93 000	8.3	7.0	15.3	12.4	2.9

2.2 静稳性 GZ 曲线特点

如图 3 所示,复原力臂 $GZ=BR-BE=BR-BG\times\sin\phi$, 其中 BG 为平台正浮时浮心和重心的高度差,对于特定的装载工况, BG 已基本确定; BR 为横倾到一定角度时浮心沿水平横向移动的距离,其数值完全由排水体积的形状所决定。从图 3 所示的圆筒型平台主船体的横剖面可以看到,主船体外板上部有着较大的外飘。当水线位于此外飘区域时,额外增加的排水体积使得浮心位置沿水平横向移动的距离更大,从而获得更大的复原力臂。并且该 FPSO 型深达到 32 m,设计干舷 10 m,较大的干舷使得甲板进水角相应变大。因此,由于主船体上部的外飘结构以及较大的型深,圆筒型 FPSO 的最大复原力臂也相应较大,使得该平台能获得更好的稳性。

仍与上节构造的船型 FPSO 进行对比,两种类型的 GZ 曲线如图 4 和表 3 所示。从对比中可以看出圆筒型 FPSO 最大复原力臂更大,静稳性曲线下的面积也更大。虽然船型 FPSO 稳性消失角略大,但是稳性校核时通常只考虑到进水角位置,在这之后的复原力臂对稳性没有帮助。因此可以判断,圆筒型 FPSO 比同规格的船型 FPSO 有着更好的稳性性能。

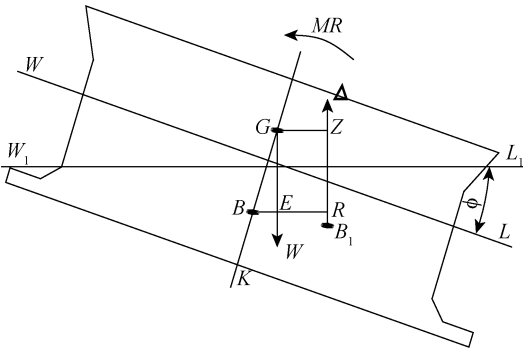


图 3 复原力臂 GZ 示意

Fig. 3 Description of righting arm GZ

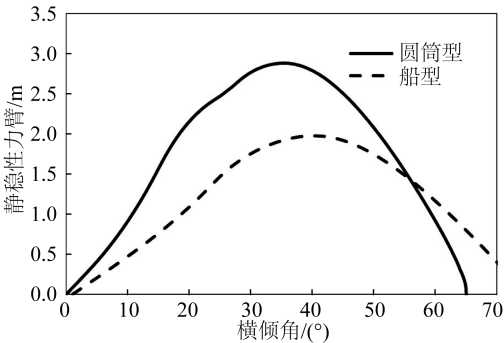


图 4 圆筒型和船型 FPSO 静稳性 GZ 曲线对比

Fig. 4 GZ curve comparison between cylindrical and ship-type FPSO

表 3 圆筒型和船型 FPSO 静稳性曲线对比

Tab. 3 GZ curve comparison between cylindrical and ship-type FPSO

横倾角/(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
圆筒型/m	0	0.41	0.91	1.57	2.16	2.47	2.77	2.88	2.79	2.51	2.08	1.54	0.92	0.05	—
船型/m	0	0.26	0.53	0.82	1.16	1.54	1.80	1.94	1.98	1.89	1.70	1.43	1.09	0.72	0.32

注:为了单纯表示不同浮体形状的 GZ 对比,两曲线均未考虑自由液面影响。

3 典型装载工况

为了校核圆筒型 FPSO 在实际操作时的稳性状况,首先需要根据作业情况,建立一系列典型的装载工况。这些工况需考虑以下几个方面:1)原油密度:根据作业油田数据和技术规格要求,密度取为 0.85 t/m³。2)空船重量和重心:经各专业计算和汇总,空船重量取 28 000 t,重心高度取 28.7m。3)装载率:分别考虑装载原油 100%、50%、10%以及空舱的情况。对于每一种原油装载,燃油、淡水、食物等消耗品也需要分别考虑 100%和 10%的装载情况。4)其它载荷:装载工况需考虑一定的甲板载荷,包含堆放区、储藏室、化学品等,也需要考虑立管和锚泊系统的拉力以及恶劣天气下覆盖在外板和上部模块的冰雪载荷等。

在综合考虑上述因素下,共建立了 8 种典型装载工况。表 4 列出了这些工况的基本信息。表中 GM 为经过自由液面修正后的初稳性高, KG 为装载工况的重心高度, KGL 为经过自由液面修正后的重心高度。

表 4 典型装载工况基本信息
Tab. 4 Information of typical loading conditions

编号	油舱装载/bbl	消耗品/%	排水量/t	吃水/m	干舷/m	GM/m	KG/m	KGL/m
L1	400 000	10	89 290	21.33	10.67	4.49	18.59	19.24
L2	400 000	100	91 920	22.00	10.00	4.12	18.89	19.51
L3	200 000	10	84 740	20.18	11.82	8.60	14.51	15.24
L4	200 000	100	87 371	20.85	11.15	7.98	14.99	15.74
L5	40 000	10	74 780	17.64	14.36	5.49	17.84	18.93
L6	40 000	100	77 410	18.31	13.69	5.14	18.25	19.09
L7	0	10	69 129	16.21	15.79	5.73	18.92	19.26
L8	0	100	71 759	16.87	15.13	5.15	19.32	19.55

满载工况 L2 为最危险工况,将该工况与船型 FPSO 进行对比,如表 5 所示。从对比中看出,圆筒型工况的吃水干舷比 d/F 更大,这是由于其水线面面积比船型要小,需要更大的吃水以达到排水量的要求。因此,圆筒型 FPSO 需要有更大的型深,以提高干舷储备。

表 5 圆筒型和船型 FPSO 满载工况对比
Tab. 5 Full load conditions comparison between cylindrical and ship-type FPSO

类型	排水量/t	型深 D/m	吃水 d/m	干舷 F/m	d/F	KG/m
圆筒型	~92 000	32	22.0	10.0	2.2	18.9
船型	~93 000	21	13.5	7.5	1.8	12.4

4 稳性校核

4.1 关于稳性衡准的选取

选取稳性校核衡准是进行分析计算的第一步,也是非常重要的一步。之前 IMO 公约以及各大船级社法规均没有专门针对圆筒型 FPSO 的稳性校核要求。10 年前,第一艘圆筒型钻井平台开始设计建造,入级挪威船级社。设计公司和船级社关于圆筒型平台的稳性衡准展开了深入的讨论和研究。由于当时圆筒型平台被定义为半潜式海洋平台,所以挪威船级社选取了 IMO MODU Code 对柱稳式平台的稳性要求作为校核标准。但由于圆筒型平台与柱稳式平台有着明显的不同,对该衡准的选取一直存在着争议。经过进一步的研究调查,挪威船级社于 2014 年发布的关于海洋平台稳性要求的标准 DNV-OS-C301,明确把圆筒型平台写入了规范。该规范认为圆筒型平台是柱稳式平台和水面式平台的结合体,校核标准倾向于柱稳式的衡准,而破损范围的界定则按照水面式和自升式平台的假定。本 FPSO 入挪威船级社,因此按照该标准进行计算。

FPSO 也需要满足 MARPOL 规范的要求。对于 MARPOL 破损范围的假定也同样存在着争议。传统的做法是把圆筒的直径作为船长和船宽进行计算的依据,而有观点认为这种破损假定偏小,应按照相同载重量船型 FPSO 的船长、船宽作为依据,但类似规格船型 FPSO 的主尺度可以有不同的组合,特别是船长是否超过 225 m 对破损假定有重要影响,因此这种观点仍缺乏具体实施办法。本文仍采用传统方法对 MARPOL 进行稳性校核。

4.2 DNV 稳性衡准校核

4.2.1 计算方法

根据 DNV 的稳性衡准,计算出恰能满足稳性要求的许用重心高度曲线,然后把典型装载工况的实际重

心与许用值进行比较,如果实际重心较低,则证明此工况满足稳性要求,否则便是稳性不足,平台安全作业得不到保证。由于计算许用重心高度时,假定所有舱室均为空舱,因此实际工况与许用值进行比较时,还须考虑液舱自由液面对重心高度的影响。圆筒型 FPSO 需要校核沿各方向倾斜时的稳性状况,以找出最危险的倾斜方向。此 FPSO 外围为 16 个均布的压载舱,因此选取计算步长为 11.25° ,以便可以与每个压载舱所跨角度切合。

4.2.2 稳性衡准

1)完整稳性。此 FPSO 需满足表 6 所示的完整稳性衡准要求。

表 6 DNV 完整稳性衡准要求^[3]

Tab. 6 Intact stability criteria of DNV Standard^[3]

编号	描述	受风风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	复原力矩曲线至第二交点或进水角(取小者)以下的面积,与风倾力矩曲线至同一限定角以下的面积的比值大于 1.3	51.5
2	复原力矩从正浮到第二交点整个范围内须为正值	51.5
3	所有在静平衡水线以下的开口均能水密关闭	51.5

2)破舱稳性。需要满足的破舱稳性要求如表 7 所示,其中假定的破损范围为在相邻的水密舱壁间,水平透入为 1.5 m,垂向高度自底部向上无限制,间距在 3 m 以内的一个或一个以上的舱壁需要考虑破损问题^[4]。

表 7 DNV 破舱稳性衡准要求^[3]

Tab. 7 Damage stability criteria of DNV Standard^[3]

编号	描述	受风风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	破损后的横倾角不大于 17°	25.8
2	第一交点与第二交点或进水角(取小者)之间的范围不小于 7°	25.8
3	在衡准 2 所述角度范围内至少有一倾角满足复原力矩与风倾力矩之比值不小于 2	25.8
4	在破损后最终平衡水线以下的开口应保持水密	25.8
5	在最终平衡水线以上 4 m 范围内的开口应保持风雨密	25.8

4.2.3 校核结果

综合完整稳性和破舱稳性的计算结果,得到了满足 DNV 衡准的许用重心高度曲线,与典型装载工况进行比较,如图 5 所示。所有典型工况重心高度均低于许用值,证明这些工况均满足衡准要求。

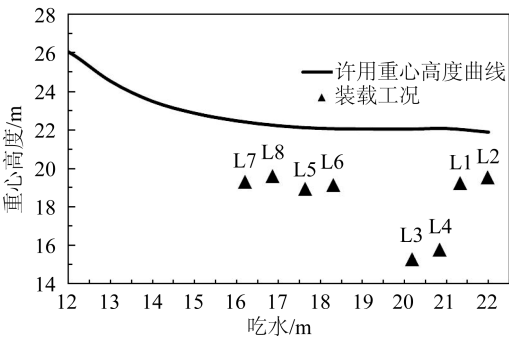


图 5 典型装载工况的校核结果

Fig. 5 Stability check results of typical loading conditions

4.3 MARPOL 公约稳性衡准校核

4.3.1 完整稳性

1) 计算工况

根据 MARPOL 附则 1 第 27 条以及统一解释 52.2,需要对所有可能的货油和压载水装载组合进行校核。这些完整工况建立时需考虑:1) 需按实际装载情况计及所有液舱的自由液面影响;2) 计算范围从轻载吃水到结构吃水;3) 消耗品需要分别考虑 97%、50%和 10%的情况;4) 货油和压载水的装载包含从最多的压载水和最少的货油组合到最少的压载水和最多的货油组合;5) 货油密度需要考虑从最小到最大的可能值;6) 从 1%到 99%的装载组合,需至少计算 20 个工况。

2) 稳性衡准

此 FPSO 需要满足以下完整稳性衡准^[5]:

a) 经过自由液面修正以后的初稳性高 GM 不小于 0.15 m;

b) 从 0°到 30°的复原力臂曲线下的面积不小于 0.055 m · rad;从 0°到 40°或进水角(取小者)的复原力臂曲线下的面积不小于 0.090 m · rad;从 30°到 40°或进水角(取小者)的复原力臂曲线下的面积不小于 0.030 m · rad;

c) 在 30°到进水角之间,至少在某个倾角下的复原力臂不小于 0.2 m;

d) 最大复原力臂所在的横倾角应大于 25°。

3) 校核结果

经计算,所有完整工况均满足 MARPOL 稳性要求。其中最危险的工况是货油密度为最小值 0.82 t/m³、装载 97%消耗品、1%压载水和最多原油时的工况,最危险的倾斜方向是 123.75°。

4.3.2 破舱稳性

1) 稳性衡准

此 FPSO 需要满足以下破舱稳性衡准^[5]:

a) 破损后的最终平衡水线应位于所有可能发生累进进水的开口之下;

b) 不对称浸水所产生的横倾角不超过 25°,如甲板边缘无浸没,这一角度最大可增至 30°;

c) 复原力臂曲线在平衡点以外的范围至少为 20°,相应的最大剩余复原力臂,在 20°范围内至少为 0.1 m,且在此范围内曲线下的面积不少于 0.017 5 m · rad。在此范围内无保护的开口不应被浸水,除非该开口所在的处所是假定浸水的。

2) 假定破损范围

公约规定的破损范围与船长和船宽有关,对于此 FPSO,船长和船宽均定义为圆筒直径,并且 FPSO 的纵向由圆筒的周向代替,横向由圆筒的径向代替。在此基础上,得到圆筒型 FPSO 的破损范围:周向破损长度 5.66 m,径向破损深度为 11.5 m,垂向破损自底部向上无限制,

3) 校核结果

经过计算,所有的典型装载工况在假定的破损发生后,均能满足 MARPOL 稳性要求。其中最为苛刻的是第一条衡准,即对于所有风雨密开口和非保护性开口的进水角要求。

5 圆筒型 FPSO 稳性影响因素分析

通过上述的研究和计算,可以得到影响圆筒型 FPSO 稳性的主要因素:

1) 主船体外形尺寸

主船体上部的外飘角度越大,最大复原力臂和对应的横倾角也越大,稳性也越好,同时也能获得更大的甲板面积。但外飘角度增大的同时,外板所承受的波浪抨击力也变大,对结构强度不利,一般来说,外飘角度最大不宜超过 30°。

圆筒直径增大对提高初稳性高 GM 的作用非常明显,同时也增大了液舱储存能力和甲板布置面积,但船体钢料重量和造价也随之提高。在做前期设计时,首先根据舱容和布置最低要求初步确定圆筒直径,再以此为基础校核稳性,并根据结果做适当调整。

增加型深会增加干舷,也会有效提高复原力臂曲线。但型深增加会使整个上部模块的重心提高,对装载

工况不利,因此在确定型深时,需综合权衡其对复原力臂曲线和空船重心的影响。

2) 装载工况

平台作业时需要合理的装载以降低重心高度,比如适当使用压载水、尽量将上部模块的甲板载荷布置在较低位置等;自由液面对稳性影响也很大,装载时要避免较大自由液面的产生,比如压载舱在使用时需尽量超过双层底高度;另外,由于货油舱的重心相对较低,当原油密度增大时,会降低整船的重心高度。因此,适当降低原油进舱时的温度,会使原油密度增加,进而提高稳性。

3) 进水点位置

大多数稳性衡准都与进水角有关系,因此增大进水角也是提高稳性的有效途径之一。对于此 FPSO,进水点主要是周边压载舱的透气管。因此可以通过增大透气管高度和尽量把透气管布置在靠近中心位置的方法来提提高稳性。

4) 舱室划分与布置

在计算破舱稳性时,破损舱室的大小、位置对结果影响很大。因此在假定的破损范围内,要合理的布置和划分舱室,避免破损舱室舱容过大、形心太靠外侧,特别是对于 MARPOL 规范,假定的破损横向深度很大,水密舱壁的布置就需要避免过多的舱室同时破损,假定破损的舱室在初始工况下可以适当装载液体,这样舱室破损后,舱室内、外液面齐平时即达到平衡位置,减小了破损以后的横倾角度;外围的 L 形压载舱也可以考虑在底部进行分隔,既减小了破舱舱容又降低了自由液面的影响。

5) 风倾力矩

平台在设计时需尽量减小风倾力矩的影响,主要是减小平台的受风面积,比如降低上部模块和生活区的层高,在安全允许下采用桁架结构代替板架结构等。平台在作业时也要避免横向面积较大的方向迎风。

6 结 语

圆筒型 FPSO 是一种新型的海洋生产储油平台,该平台在建造成本、稳性、甲板承载能力和结构强度方面都有着较大的优势^[6],市场前景广阔。经过详细的计算,验证了此圆筒型 FPSO 能满足 DNV 和 MARPOL 对稳性的要求。分析研究了圆筒型 FPSO 稳性的主要影响因素,对平台的设计人员提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 陈新权,谭家华. 巨型 FPSO 装载过程稳性分析[J]. 中国海洋平台,2006,21(2):24-28. (CHEN X Q, TAN J H. Stability analysis of a large FPSO during loading [J]. China Offshore Platform, 2006, 21(2): 24-28. (in Chinese))
- [2] 盛振邦,刘应中. 船舶原理[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003:54. (SHENG Z B, LIU Y Z. Principle of naval architecture [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003: 54. (in Chinese))
- [3] DNV-OS-C301, Stability and watertight integrity, offshore standard[S]. Det Norske Veritas, 2014.
- [4] 孙东昌,潘斌. 海洋自升式移动平台设计与研究[M]. 上海:上海交通大学出版社,2008. (SUN D C, PAN B. Design and research of self-elevating mobile platform [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2008. (in Chinese))
- [5] IMO. International convention for prevention of pollution from ships (MARPOL) [M]. London: International Maritime Organization, 2013.
- [6] 吴家鸣. FPSO 的特点与现状[J]. 船舶工程,2012,34(Z2):1-4. (WU J M. Distinguishing feature and existing circumstances of FPSO [J]. Ship Engineering, 2012, 34(Z2): 1-4. (in Chinese))