

文章编号: 1008-2336 (2020) 04-0085-06

简易导管架平台结构设计及选型研究

刘娟, 王亮, 李晨光

(中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司石油工程技术研究院, 上海 200120)

摘要: 简易导管架平台指结构型式简单、重量轻、上部设施较少的海洋油气生产平台。为了更好地进行平台结构设计选型, 此文设计了一种单腿三立柱结构型式的简易导管架平台, 方案一采用独立桩腿型式, 方案二采用将主立柱兼作桩腿的型式, 分别从静力、疲劳和倒塌三方面进行了结构设计、分析比较和选型研究。分析结果表明, 方案一独立桩腿结构型式的导管架力学性能更优, 为今后设计类似简易导管架平台提供参考依据。

关键词: 简易导管架平台; 结构设计; 疲劳分析; 倒塌分析

中图分类号: TE951 文献标识码: A DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2020.04.085

Research on Structural Design and Selection of Minimal Jacket Platform

LIU Juan, WANG Liang, LI Chenguang

(Offshore Petroleum Engineering Institute of SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Minimal jacket platform refers to the offshore oil and gas production platform with simple structure, light weight and less topside facilities. In order to design and select platform structure better, a minimal jacket platform with a single-leg three-post structure type was designed in this paper. Option one uses the independent leg type, and option two uses the main column as the leg type. The structural design, comparison and selection research were carried out from three aspects: static force, fatigue and collapse analysis. The analysis results show that the mechanical performance of the jacket with independent leg type is better, which provides reference for the design of this kind of minimal platform in the future.

Keywords: minimal platform; structural design; fatigue analysis; collapse analysis

我国渤海、南海分布着众多小型边际油气田, 若按常规方式和技术开发这些油气田, 则不具备开采效益。因此, 寻求一种能降低开发投资、提高经济效益、技术安全可靠的新技术成为必然趋势, 简易导管架平台使小型边际油气田的经济有效开发成为可能。简易导管架平台发展至今已有30多年历史, 其结构型式表现出多样化, 美国开发的MOSS简易导管架平台, 主要采用裙桩支撑垂直导管架结构、LL&E简易导管架平台, 为裙桩三脚导管架结构。近年来, 国内简易导管架平台也发展迅速, 主要有独柱多桩式、两柱三桩式和三柱三桩式3种结构型式。不同类型的简易导

管架平台适合的水深和海况条件不同, 因此对简易导管架平台进行结构设计和选型研究十分必要。本文主要针对中石化南海北部湾某小型边际油气田进行简易导管架结构选型设计, 通过方案对比研究, 形成推荐方案, 为开发该小型边际油气田导管架平台结构设计提供参考依据。

1 简易导管架平台设计概述

简易导管架平台结构设计的原理、方法和手段与常规导管架平台并无区别, 应用的标准和规范也相同, 但需重点考虑的内容有所不同^[1]。由于

收稿日期: 2019-12-27; 改回日期: 2020-04-10

第一作者简介: 刘娟, 女, 1991年生, 硕士, 助理工程师, 2017年毕业于江苏科技大学船舶与海洋工程专业, 现从事海洋工程结构设计研究工作。E-mail: liujuan.shhy@sinopec.com。

简易导管架平台结构的冗余度较小，因此需特别考虑平台的疲劳分析；在进行平台设计时，需控制安全余量、考虑适度的强度储备，因此有必要进行倒塌分析。本文针对简易导管架平台，主要从静力分析、疲劳分析和倒塌分析三个方面进行设计和分析。

1.1 静力分析

静力分析是海洋平台最基础的分析，目的是确保海洋平台在操作和极端环境条件下具有承受上部设施荷载的能力，满足油气田开发的需要。本文运用海洋工程分析软件 SACS，评估了平台结构在操作环境工况和极端环境工况下，构件的整体应力水平情况，保证其不超过许用应力。分析计算时，操作环境工况采用一年一遇环境条件，极端工况采用百年一遇环境条件，根据 API RP 2A^[2] 规定，极端风暴工况下，允许构件的许用应力增大 1/3。

1.2 疲劳分析

处于海洋环境中的导管架平台由于长期遭受随机波浪荷载的作用，其结构内部将产生随时间变化的应力，平台抵抗这种交变应力的能力随着时间的累积而逐年降低，这种结构强度降低的现象即为疲劳破坏。对于单腿导管架平台，腿柱上的管节点极易发生低周疲劳破坏^[3-4]，因此，通过优化结构设计达到提高节点疲劳寿命的能力至关重要。

本文采用线性累计损伤法中的谱分析法评估管节点的疲劳寿命，该方法主要根据应力循环 (S-N) 曲线计算每一级的荷载造成的损伤，按照 Miner 准则通过累积损伤度估算节点疲劳寿命。选用美国石油协会 (API) 的推荐做法估算管节点疲劳寿命。

1.3 倒塌分析

海洋平台作为大型超静定钢结构，在设计阶段通常具有一定的强度冗余，即当某一局部杆件达到屈服强度后，平台仍有可能继续承受较大的荷载^[5-6]。因此，需要通过平台进行倒塌分析来评估平台结构的极限强度。

本文运用 DNV 研发的结构有限元软件 USFOS 进行简易导管架平台的倒塌计算分析。USFOS 软件在结构遭受碰撞或损坏后的完整性评价、倒塌

分析等方面表现突出，能够较精确地模拟平台结构从屈服到完全变形直至最后倾倒的全过程。倒塌分析采用百年一遇的环境条件，垂向荷载一步加载到平台结构上，水平环境荷载实行分步加载，直至平台发生倒塌，倒塌时的环境力系数即为结构储备强度系数 (RSR)，通常用来评估结构的整体安全性能，根据规定，RSR 设计值一般不小于 1.6^[7]。

2 分析研究实例

本文选定我国南海北部湾某油田作为目标研究区块，该油田属于边际油田，水深 50 m (海图水深)。针对该区域海洋环境条件和油田产量，并结合各类型简易导管架平台结构特点及应用现状，初步选定单腿三桩的简易导管架平台作为研究对象，平台设计寿命为 20 年。在满足油田正常生产的情况下，进行了最简化设备配置，组块上不设油气处理设施，不设生活楼、火炬臂和直升机甲板，油气水通过海管混输到周边平台进行处理。为了对结构型式进行优选，在保持主腿柱、相同部位拉筋尺寸不变和组块设备荷载相同的情况下，分别设计了方案一 (独立桩腿型式) 和方案二 (主立柱兼作桩腿) 两种结构型式 (图 1)。



图 1 两种方案结构模型

2.1 设备配置

该简易导管架平台在满足生产要求情况下,按照最简化原则进行设备配置^[8]。平台设备配置见表1,主要配备主工艺系统、开闭排(放空)系统、化学药剂注入系统、公用系统及消防救生系统等。

本简易平台上部甲板分为主甲板和二层甲板,其中二层甲板上主要布置配电间和储藏间。在设备布置时进行了整体考虑,各设备之间留有一定的空间,既能保证工艺流程合理顺畅并能满足操作、维修等需要。组块甲板布置图见图2。

2.2 平台设计参数

导管架主腿柱直径选为1 727 mm(68 in),隔水套管布置在主腿柱内,直径选为610 mm

(24 in),钢桩直径选为1 372 mm(54 in),入泥深度40 m。组块主甲板尺寸为14 m×14 m。

2.3 静力分析

静力分析考虑了环境荷载和使用荷载对平台的作用,其中:环境荷载包括风、浪、流等荷载;使用荷载指平台在位使用期间,平台本身及上部设施产生的重量荷载。组合荷载考虑了可能的最不利的荷载组合,包括结构自重、设备重量、设备操作重量、活荷载、操作环境荷载、极端环境荷载等,荷载组合系数见表2。静力分析主要包含4个输入文件,分别为模型文件(sacinp)、海况文件(seainp)、桩土文件(psiinp)和节点校核文件(jcinp)。海况文件主要包含澜洲海域的

表1 简易导管架平台设备表

序号	设备编号	设备名称	数量	重量/台(t)		备注
				干重	操作重	
主工艺系统						
1	WHPA-X-1210	测试/生产管汇橇	1	4	5	
2	WHPA-X-1310	测试分离器	1	4.5	6	
3	WHPA-X-1510	清管球发射器	1	4	4.5	
柴油系统						
4	WHPA-P-3220	压井泵	1	6.5	7	往复泵
闭式排放系统						
5	WHPA-X-6610	闭式排放 & 放空系统	1	5	10	卧式
开式排放系统						
6	WHPA-T-3510	开式排放系统	1	4	16	
化学药剂注入系统						
7	WHPA-X-3610	化学药剂注入橇	1	6	13	
仪表/公用风系统						
8	WHPA-X-3710	仪表风系统(N ₂ 瓶撬)	1	1.2	1.2	
消防系统						
9	WHPA-X-6201	消防系统	1	1.2	1.2	CO ₂ 瓶组
救生逃生系统						
10	WHPA-LE-6505	气胀式救生筏	1	—	—	
11		救生圈等救生设备	足够			
其他						
12	WHPA-DEG-7001	应急发电机	1	5	6	
13	WHPA-T-7001	应急柴油罐	1	2.5	5.5	
14	WHPA-L-5401	电动吊机	1	3.7	5	电驱动

备注:电气间暂按2t考虑。

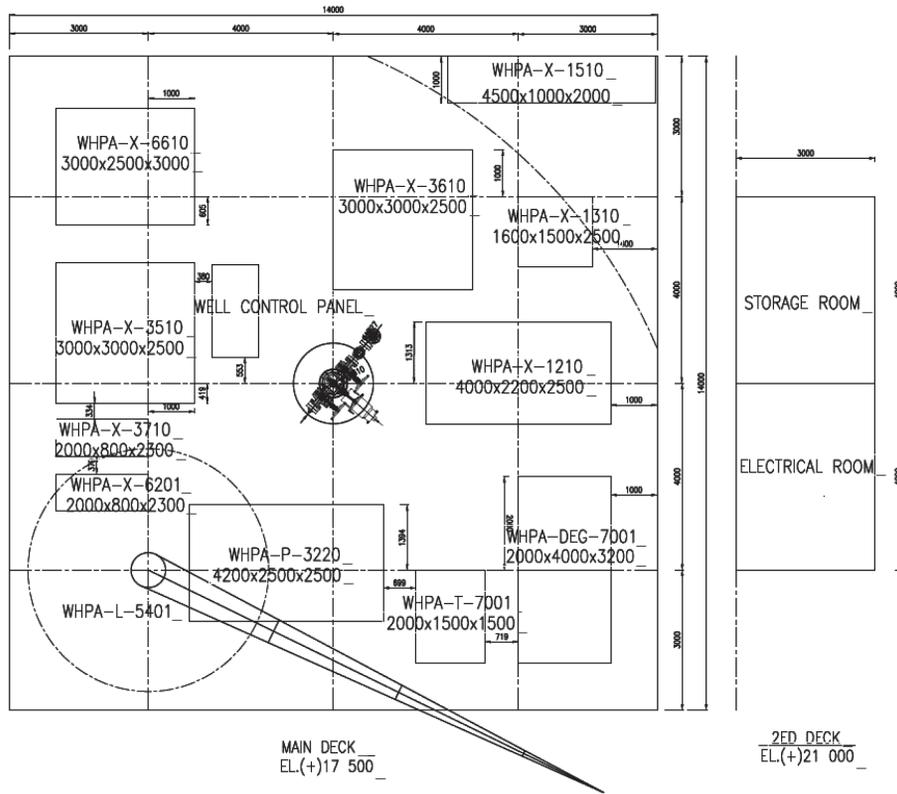


图2 组块甲板布置图

风、浪、流、海生物等参数，参照相关报告输入。桩土文件包含土壤参数，程序根据输入的 psiinp 文件生成相应的桩土非线性弹簧。节点校核文件主要设置了节点校核标准，并定义需要校核的节点名称，程序按照节点编号及校核标准对节点进行逐一校核。

表2 荷载组合系数表

	结构重	设备重	活荷载	操作环境荷载	极端环境荷载
操作工况	1.0	1.0	1.0	1.0	—
极端工况	1.0	0.75	0.75	—	1.0

对两种方案的简易导管架平台进行静力分析，得到图3所示的应力云图。从图中可以看出，两种方案下结构的UC值均小于1，符合规范要求。方案一中，最大应力发生在杆件LG2，主腿柱和拉筋的连接杆件处，最大UC值为0.52。方案二中，各杆件受力较均匀，最大应力发生在杆件LG3，同样为主腿柱和拉筋的连接位置处，最大UC值为0.28，从静力结果分析可知，两种方案均没有出现较明显的应力集中现象。

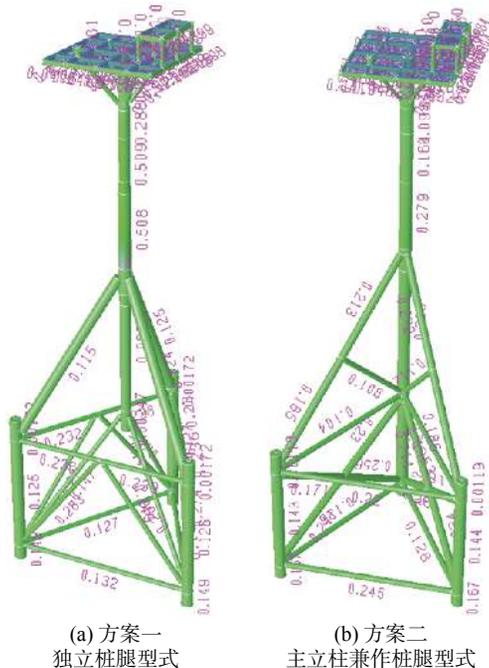


图3 静力计算应力云图

2.4 疲劳分析

在疲劳分析之前需使用 DYNPAC 模块分析结构固有频率，以便确定采用动态谱疲劳还是静态谱疲劳分析方法。DYNPAC 程序模块可生成结构动力特性，包括特征值/固有频率和特征向量/模态形状。为了得到结构响应的适当代表值，并不需

要把所有振型都包括在内, 按质量参与系数的大小进行筛选。模态分析结果见表 3, 其中, 方案一列出前 4 阶模态, 方案二列出前 5 阶模态。

表 3 模态分析结果

模态	方案一	方案二
1	1.58	1.51
2	1.57	1.44
3	0.97	1.36
4	0.97	0.85
5	—	0.81

考虑到单立柱平台节点少, 节点疲劳分析至关重要, 本项目采用谱疲劳方法对简易平台两种方案分别进行了疲劳分析, S-N 曲线采用“API X”。平台设计寿命 20 年, 采用增加 1 年寿命来考虑运输过程中产生的疲劳损伤, 疲劳分析中平台需满足 21 年疲劳寿命要求 (考虑 5 倍安全系

数)。SACS 疲劳分析主要流程见图 4。

疲劳分析结果显示, 两种方案的疲劳寿命均满足规范要求。方案一最小疲劳寿命为 70.52 年, 发生在 2001 节点 (2001-203S); 方案二最小疲劳寿命发生在 301L 节点 (301L-2001), 疲劳寿命为 24.57 年, 分析结果见表 4。

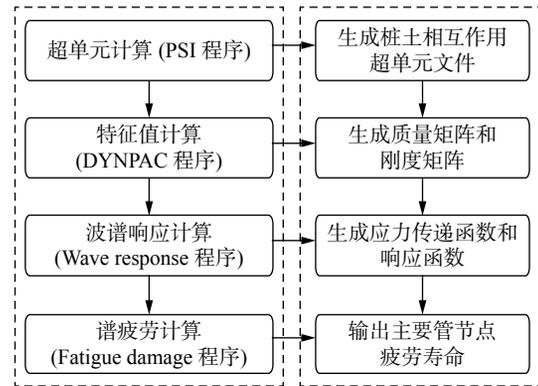


图 4 简易导管架平台谱疲劳分析流程

表 4 最小疲劳寿命点

	节点	杆件	节点类型	杆件类型	应力集中系数				疲劳寿命/年
					轴向力冠点	轴向力鞍点	面内弯	面外弯	
方案一	2001	2001-203s	K	弦杆	6.26	5.63	3.31	12.32	70.52
方案二	301L	301L-2001	Y	撑杆	2.92	3.71	2.72	3.18	24.57

2.5 倒塌分析

倒塌分析中考虑桩-土相互作用, 土壤数据根据《平台轴向桩承载力设计参数表》输入, 模型中土壤直径越大, 表示土层越强。倒塌分析计算时主要考虑的荷载包括: 结构垂向荷载 (甲板设备荷载、活荷载、阳极块重量和结构自重) 和结构水平荷载 (环境荷载)。在 USFOS 中设置分析步数为 50 步, 最大加载步长为 1, 最小步长增量 0.01。分析中选取了八个典型方向 (0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°) 施加环境荷载。环境荷载用百年一遇环境条件 (表 5)。

表 5 百年一遇环境参数

波浪	水深/m	50
	最大波高/m	14.3
	波周期/s	10.9
海流	表层流速/(cm/s)	190
	中层流速/(cm/s)	144
	底层流速/(cm/s)	111

在实际分析过程中, 由于风荷载对上部组块的影响较小且在倒塌分析中不起主要作用, 因此, 此次计算分析忽略风荷载的影响。

对 5 种荷载及 8 个环境工况进行组合分析, 得到两种不同结构设计方案的简易导管架平台的倒塌分析结果, 用储备强度系数 RSR 来表示平台的极限承载力, 分析结果见表 6。

从表 6 看出, 两种方案的导管架平台都具备

表 6 两种方案倒塌分析计算结果

荷载方向/(°)	结构储备强度系数 RSR		基底剪力/kN	
	方案一	方案二	方案一	方案二
0	2.8	1.9	5 878.34	6 185.32
45	2.5	1.9	5 533.51	5 682.47
90	2.1	1.8	8 095.51	4 318.58
135	2.5	2.0	5 919.36	5 813.37
180	2.5	1.9	5 894.02	6 180.16
225	2.4	2.0	6 028.88	5 470.29
270	3.1	2.0	5 892.74	6 105.57
315	2.4	1.8	4 808.44	5 443.31

一定的储备强度系数,均满足规范要求,整体上方案一的平台结构承载力更大。在 270° 环境力载荷方向上,方案一RSR最大值达3.1,即在百年一遇环境工况下,平台结构仍能承受2.1倍的极端环境载荷。方案二中,各方向上RSR系数相差不大。

从 0° 方向倒塌分析塑性变形图(图5)中可以看出,主腿柱和拉筋的节点处杆件应力最大,属于平台结构杆件薄弱区,与静力计算中SACS结果吻合。两种方案下的平台结构整体刚度较大,而桩基相对薄弱,出现较为明显的应力集中现象。

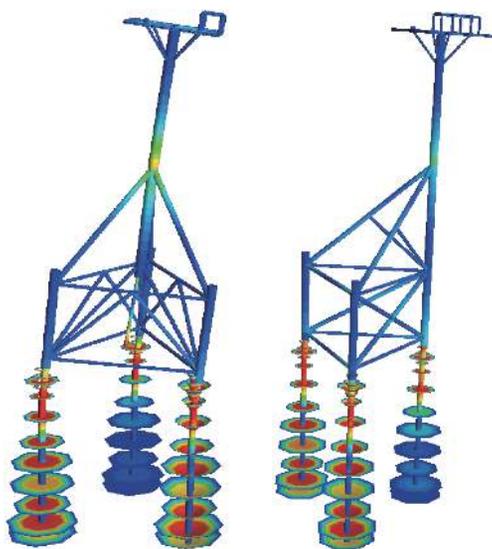


图5 0° 方向倒塌分析塑性变形图

3 结论和建议

本文设计了两种不同结构型式的单腿三立柱简易导管架平台,方案一为独立桩腿型式,方案二为主立柱兼作桩腿型式,分别从静力、疲劳和倒塌三个方面进行分析研究,得到结论如下。

(1) 静力分析结果表明,主桩腿和拉筋的连接杆件为整个平台结构的薄弱区,但两种设计方案仍均能满足规范要求,并且有一定的余量,因此,静力分析不能作为方案比选的依据。

(2) 疲劳分析结果表明,方案一中的最小疲劳寿命为70.52年,远大于方案二的最小疲劳寿命24.57年,说明在同样条件下,方案二简易导管架平台更易发生疲劳破坏。

(3) 倒塌分析结果表明,方案一的储备强度系数总体高于方案二,说明结构整体刚性更大,且没有出现明显的应力集中区。两种方案中,桩为整个结构的薄弱部分,采用该结构型式时,建议重点关注桩基承载力。

(4) 通过综合分析,选择方案一独立单腿三立柱简易导管架平台结构型式为推荐方案。

参考文献:

- [1] 王立忠. 简易平台技术的研究[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(2): 41-44.
- [2] American Petroleum Institute. API RP 2A-WSD-2000 Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design[S]. Washington: American Petroleum Institute, 2000.
- [3] 曹文冉, 刘振纹. 单腿导管架平台管节点疲劳寿命评估//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集[C]. 南宁: 中国海洋学会, 2015: 24-30.
- [4] 姚艳萍, 陈瑞峰, 林钟明. 导管架平台管节点的疲劳分析与寿命估计[J]. 中国造船, 2003, 44(增刊): 303-308.
- [5] 刘东亮. 基于USFOS程序的导管架固定平台倒塌分析[J]. 天津科技, 2019, 46(4): 78-81.
- [6] 刘续, 陈达, 钱亚林. 基于Usfos的非线性分析程序研究海洋平台的极限承载力[J]. 海洋石油, 2016, 36(1): 83-86.
- [7] 《海洋石油工程设计指南》编委会. 海洋石油工程边际油田开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [8] 李宁. 平台上部设施重量的控制[J]. 中国海上油气(工程), 1990, 2(6): 33-34.