

# 东海4腿导管架平台极限承载能力分析

余正林, 吴文秀

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年8月29日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年9月29日

## 摘要

以我国东海某4腿现役导管架平台为研究对象, 采用SACS对该平台进行有限元建模, 分析了平台所受基本载荷与环境载荷作用。通过非线性倒塌分析方法, 综合考虑海生物附着厚度和结构腐蚀等因素, 对平台进行了极限承载能力评估。结果分析表明, 从不同方向对平台施加载荷, 平台的极限承载能力有所差异, 载荷从平台坐标系 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  4个方向作用时的强度储备系数较其他方向小; 在考虑海生物不同厚度对平台的作用后, 平台各方向的强度储备系数发生了明显下降。不同倍数的原始海生物厚度将导致强度储备系数不同程度的下降, 当厚度为原始厚度2倍时, 平台各方向的强度储备系数下降最大。

## 关键词

导管架平台, 极限状态, 海生物, 强度储备系数

# Ultimate Bearing Capacity Analysis of a 4-Legged Jacket Platform in the East China Sea

Zhenglin Yu, Wenxiu Wu

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: August 29, 2025; accepted: September 22, 2025; published: September 29, 2025

## Abstract

Taking an in-service four-legged jacket platform in the East China Sea as the research object, this study established a finite element model of the platform using SACS and analyzed the basic and environmental loads acting on the structure. Through nonlinear collapse analysis, the ultimate bearing capacity of the platform was evaluated, with comprehensive consideration of marine growth thickness and structural corrosion. The results indicate that the platform's ultimate bearing capacity varies under loads from different directions. Specifically, the strength reserve factors are rela-

tively lower when the loads act along the  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , and  $270^\circ$  directions of the platform coordinate system compared to other directions. After taking into account the effects of marine organisms of different thicknesses on the platform, the strength reserve coefficients of the platform in various directions have shown a significant decline. Different multiples of the original thickness of marine organisms will result in different degrees of reduction in the strength reserve coefficients. When the thickness is twice the original value, the strength reserve coefficients of the platform in all directions experience the most substantial decline.

## Keywords

Jacket Platform, Ultimate Limit State, Marine Growth, Reserve Strength Ratio

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着海洋油气资源的持续开发, 导管架平台作为海洋工程的关键基础设施, 在我国多个海域得到了广泛应用, 本文研究的导管架平台为采用四腿导管架结构的固定式平台, 作业水深达 100 m, 属于中等水深导管架平台。因此, 平台的安全运行对保障海上油气资源开采以及推进平台结构相关技术研究具有重要的工程意义。

我国渤海海域的油气开发起步较早, 现有导管架平台极限承载能力的研究多集中于浅水或中等水深区域。与渤海相比, 东海海域受台风影响更为频繁, 风、浪、流等环境荷载的联合作用对平台结构的动力效应更为显著[1], 而渤海平台则主要关注冰荷载的影响[2]。在这一背景下, 东海海域导管架平台的结构安全性分析, 尤其是其在极端灾害环境下的极限承载能力, 成为亟待深入研究的课题。

在既有研究中, 吕涛[3]提出了基于振动响应的平台时变极限承载力分析方法, 安振武[4]则发展了基于振动检测数据与有限元模型结合的结构状态评估方法, 并在东海某平台中验证了其适用性。这些研究强调了动力响应分析在平台健康监测与安全评估中的重要性。然而, 目前针对东海海域导管架平台的静力性能及系统性的极限状态评估研究仍相对有限, 尚未形成统一的标准与方法。

鉴于东海海域特有的环境条件, 尤其是海生物附着所导致的结构表面粗糙度增加和波浪载荷增大, 本研究将重点分析海生物厚度变化对波浪载荷及平台整体力学行为的影响, 并将海生物厚度的合理选取纳入极限状态评估体系之中。本文采用非线性连续倒塌分析方法[5], 重点分析了在极端风暴条件下导管架平台的极限承载能力。分析过程中, 综合考虑了桩-土非线性相互作用以及长期腐蚀对平台结构性能的耦合影响, 以为东海海域在役导管架平台的安全评估与寿命预测提供理论依据和实用方法。

## 2. 计算模型

### 2.1. 平台简介

本文研究对象为四腿导管架平台作业水深 106.16 米, 采用双斜结构(X、Y 方向斜率均为 1:10)。平台主体为三层甲板, 分别为顶部甲板(EL + 32000 mm, 34 m × 52 m)、底部甲板(EL + 24800 mm, 39 m × 50 m)和工作甲板(EL + 19800 mm, 35 m × 16 m)。导管架顶端(EL + 9830 mm)设有四个支撑点, 与上部甲板模块腿柱对应。结构底部由布置于四角的 12 根垂直裙桩(直径 2134 mm, 壁厚 40~55 mm)固定, 裙桩打入海床深度达 90 米。

该导管架区别于传统四腿导管架, 该平台无主桩, 全部采用垂直裙桩; 导管架上部通过四点支撑上部模块, 中部核心为四立柱框架, 底部由四角共 12 根裙桩群固定。

## 2.2. 有限元模型建立

采用专业海洋工程有限元软件 SACS 进行有限元建模, 考虑到桩 - 土作用力影响, 本算例采用 API 规范推荐的 P-Y 曲线法, 根据东海的土壤特性将土壤划分为 19 层, 使结构模型更加准确可靠。

图 1 为建立的导管架平台模型。整个导管架平台所采用的材料均为海工高强度钢, 弹性模量  $20,000 \text{ KN/cm}^2$ , 泊松比 0.3, 密度  $7850 \text{ k/m}^3$ , 屈服应力  $355 \text{ MPa}$ 。东向为平台坐标系 X 正向。

Active Structure



Figure 1. Jacket-and-gantry-platform model

图 1. 导管架平台模型

## 3. 计算模型与载荷

### 3.1. 结构载荷

#### 3.1.1. 导管架载荷

导管架部分载荷由以下两部分组成:

1) 导管架重量及浮力(包括海生物重量及受到的浮力)由程序根据导管架的几何参数、材料类型计算生成。考虑到计算模型和实际重量之间的工程误差, 对计算机生成的结构重量增加 8% 的不确定系数。

2) 未建模构件(如走道、牺牲阳极、楼梯等)的重量, 经浮力折减后, 以  $14,900 \text{ KN}$  的总荷载施加于结构相应节点。

### 3.1.2. 上部模块载荷

上部模块载荷包括输入计算模型受力构件的自重、未建立模型构件的重量、甲板设备操作重量、甲板活载荷等。具体如下:

(1) 输入计算模型部分上部结构自重, 该部分由计算机程序自动生成, 与导管架重量生成在同一载荷工况。(2) 未建立模型部分结构重量: 7505 KN。(3) 甲板设备载荷: 由设备重量、管道重量、装备重量、电气设备重量、设备操作重量、管道操作重量、装备操作重量; 共 40,575 KN。(4) 甲板活载荷: 共 11,625 KN。(5) 生活楼载荷: 共 11,180 KN。

## 3.2. 环境载荷

### 3.2.1. 环境载荷设计衡准

环境参数由实地观测获得。计算校核中, 正常作业状态采用一年一遇风浪流条件, 风暴自存状态采用百年一遇风浪流条件。具体包括以下环境载荷。

### 3.2.2. 风载荷

风载荷导管架平台水上部分的结构承受的主要载荷, 在东海这类易存在台风的海域, 风速对平台所受的侧向载荷影响巨大。对各层甲板以上结构和设备的风载荷, 本计算定义相应的受风面积和受力节点, 由程序自动计算各个方向的受风面积, 分配给相应的节点; 高度系数和形状系数则由构件截面形状确定, 由程序形成风载荷直接作用于构件上。最大风速的选取如表 1:

Table 1. Wind speed

表 1. 风速

项目	风速
风暴自存状态(百年一遇)	54.4 m/s
作业状态(一年一遇)	30.1 m/s

### 3.2.3. 波浪载荷

基于波浪理论, 平台导管架等水下结构属于小尺度圆形构件, 适用 Morison 公式计算波浪力。

$$F = 0.5 \cdot C_o \cdot \rho \cdot D \cdot u \cdot |u| + C_o \cdot \rho \cdot V_o \cdot \dot{u}$$

式中变量的意义参见 API RP 2A [6]。波浪数据见表 2。

Table 2. Wave data

表 2. 波浪数据

重现期	最大波高 $H_{\max}$ (m)	波浪周期 $T_{\max}$ (s)
1 年	13.60	11.40s
100 年	22.90	13.70

### 3.2.4. 流载荷

Morison 公式计算波浪力时, 波速考虑海流的矢量叠加, 假设海流沿水深呈线性分布。在进行结构静强度计算时假设波浪、流各向均匀分布, 海流参数见表 3。

### 3.2.5. 海生物

海生物导致水下构件几何尺度和阻力系数、惯性系数增大, 使其承受较大的波浪载荷。计算波浪力时考虑海生物的影响: 即考虑海生物对水下构件尺度和粗糙度的增加和对阻力系数和惯性系数的影响。

根据标准[6]选取系数见表 4。

**Table 3. Current**

**表 3. 海流**

项目	作业条件	极限条件
最大波高	13.60 m	22.90 m
对应流速	1.312 m/s	1.979 m/s

**Table 4. Drag coefficient and inertia force coefficient**

**表 4. 阻力系数与惯性力系数**

系数	干净构件	附着海生物
CD	0.65	1.05
CM	1.60	1.20

### 3.2.6. 腐蚀

导管架平台长期服役于海洋环境, 其材料在服役过程中势必会出现不同程度的腐蚀与老化, 导致极限承载力下降, 故需考虑腐蚀影响。本算例导管架于 2006 年全面投产, 其设计飞溅区的高程范围为 EL - 3070 mm~EL + 5830 mm, 飞溅区的桩腿考虑了 7.5 mm 的腐蚀余量, 飞溅区范围的斜撑考虑 3.75 mm 的腐蚀余量。根据标准[7], 假定飞溅区平台结构的腐蚀速率为 0.5 mm/a, 长期浸泡在海水中的结构腐蚀速率为 0.3 mm/a。

### 3.3. 载荷计算工况

由于该导管架平台的不对称性, 假设以 X 负向为 0°方向, 依次逆时针旋转 45°得到 8 个主要方向, 从 8 个主要方向施加上述环境载荷与结构载荷, 假设施加载荷时风、浪、流载荷视为同向。

## 4. 平台极限承载能力计算分析

本算例采用非线性“静态推倒”方法进行极限强度分析。具体流程如下:

**初始载荷加载:** 依次施加平台自重、设备载荷及浮力作用。

**环境载荷加载:** 施加百年一遇台风环境载荷组合。其中, 波浪载荷通过自动相位搜索确定产生最大作用力的相位角, 进而得出最大基础剪力(即参考载荷)。

**推倒分析:** 在参考载荷基础上递增加载直至平台倒塌。倒塌判据为基础剪力趋于平缓或下降, 此时的剪力值用于计算平台强度储备系数(RSR 值)。

### 4.1. 考虑海生物厚度不同条件的平台极限承载能力分析

海生物附着会增大平台自重, 同时增加杆件直径及表面粗糙度, 增强水动力阻力, 导致环境荷载增大。本次计算假设海生物分布符合原始设计值, 海生物厚度取值参考 API RP 2A-WSD [6]及 DNV-RP-C205 [8]中的经验参数。海生物厚度如表 5, 海生物厚度的放大倍数采用原设计厚度的 1 倍、1.5 倍、2 倍、2.5 倍、3 倍计算。海生物比重根据实测取 1.4 MT/m<sup>3</sup>。

**Table 5. Thickness of marine organisms**

**表 5. 海生物厚度**

水深(m)	1 倍厚度(cm)	1.5 倍厚度(cm)	2 倍厚度(cm)	2.5 倍厚度(cm)	3 倍厚度(cm)	
0	38	5	7.5	10	12.5	15

续表

38	40	5.8	8.7	11.6	14.5	17.4
40	45	5.2	7.8	10.4	13	15.6
45	50	4.6	6.9	9.2	11.5	13.8
50	55	4.2	6.3	8.4	10.5	12.6
55	60	3.7	5.55	7.4	9.25	11.1
60	65	3.4	5.1	6.8	8.5	10.2
65	70	3	4.5	6	7.5	9
70	75	2.7	4.05	5.4	6.75	8.1
75	80	2.4	3.6	4.8	6	7.2
80	85	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6
85	90	2	3	4	5	6
90	100	1.6	2.4	3.2	4	4.8

## 4.2. 分析结果

### 4.2.1. 杆件 UC 校核结果

对导管架施加不同方向的环境载荷后, 导管架主腿的 UC 值会随之变化。当从  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $315^\circ$  方向施加环境载荷时, 由于受环境载荷影响, 受压一侧的主腿 UC 值较其余主腿明显增大, 与实际情况相符合。当从  $45^\circ$  方向施加载荷时将会得到最大 UC 值, 如图 2。根据 API RP 2A-WSD 规范, 导管架及其附属结构的所有杆件的名义应力应小于结构的容许应力, 即 UC 值小于 1。对于极端风暴条件, 容许应力可增加  $1/3$ , 即所有杆件的 UC 值小于 1.33。

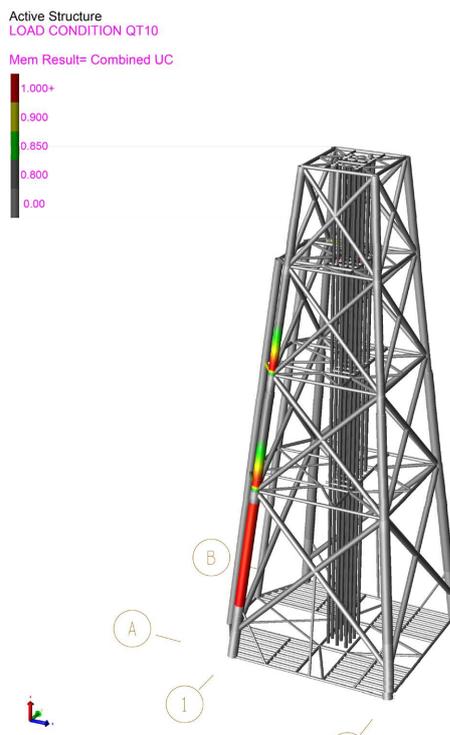


Figure 2.  $45^\circ$  direction UC value cloud diagram  
图 2.  $45^\circ$  方向 UC 值云图

杆件的最大 UC 值总结见表 6。结果表明, 在百年一遇极限状态情况下, 导管架的各杆件强度均满足强度要求。但需要注意的是, 当环境载荷从 45°方向施加时, 由于二、三层主腿的直径变化较大, 导致此处局部应力集中, UC 值也随之增大。对于这部分杆件可进行适当的加强, 如采用贴板、加强环等局部改造措施。

**Table 6. Rod UC result**  
**表 6. 杆件 UC 结果**

杆件部位	界面尺寸	最大 UC 值
桩腿	Φ1828 × 75	1.095
斜撑	Φ1371 × 19	0.828
水平层 EL (+) 7000	Φ508 × 40	1.060
水平层 EL (-) 14000	Φ760 × 30	1.004
水平层 EL (-) 38000	Φ620 × 30	0.924
水平层 EL (-) 65000	Φ760 × 30	0.847
水平层 EL (-) 106000	Φ609 × 25	0.652

#### 4.2.2. 平台的极限承载能力分析

为直观评估海生物厚度对平台极限承载力的影响, 现将平台 8 个方向不同海生物厚度的强度储备系数进行对比。参考 CCS 的《固定式导管架结构可靠性分析及应用指南》[9], 可接受的最小 RSR 选取为 1.6。

**Table 7. Rod UC result**  
**表 7. 杆件 UC 结果**

厚度	方向	0 度	45 度	90 度	135 度	180 度	225 度	270 度	315 度
1 倍厚度		2.5	3	2.4	2.9	2.4	2.9	2.6	2.8
1.5 倍厚度		2.5	3	2.3	2.9	2.3	2.9	2.4	2.8
2 倍厚度		2.4	2.8	2.2	2.6	2.2	2.7	2.3	2.5
2.5 倍厚度		2.3	2.6	2.2	2.4	2.1	2.4	2.2	2.3
3 倍厚度		2.2	2.3	2.1	2.3	2.0	2.3	2.0	2.2

根据表 7, 在海生物厚度达到原始厚度 3 倍时, 平台 RSR 系数达到 2.0, 相对安全系数(1.6)仍有一定的余量。

## 5. 结论

(1) 当环境载荷从不同方向作用时, 导管架平台的极限承载能力各有差异。从表 6 数据可见, 载荷作用于 0°、90°、180°、270°方向时, 平台强度储备系数(RSR)显著低于其他方向, 需重点关注。

(2) 随着平台服役时间的延长, 海生物厚度的增加在影响波浪载荷中起关键作用, 在考虑不同倍数原始海生物厚度的作用后, 平台在 8 个方向上的强度储备系数出现了不同程度的下降, 其中在 270°方向作用时, 平台强度储备系数的下降更加明显。为保证平台有一点的安全余量, 建议平台海生物厚度达到原始设计厚度 2 倍时进行清理。

(3) 部分杆件需重点关注, 可采用适当方法强化结构, 保障导管架平台安全生产。

(4) 结果表明, 本算例的导管架结构构件尺寸与强度满足规范要求, 能承受东海海域在位载荷, 符合使用需求。

## 参考文献

- [1] 左华楠. 恶劣风浪下深水导管架平台结构强度分析研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [2] 常松亮, 李楷, 夏华波, 等. 渤海湾冰载荷作用下 LNG 浮式转接驳结构响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(9): 83-90.
- [3] 吕涛, 徐长航, 陈国明, 等. 基于振动响应的导管架平台极限承载能力分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 155-162.
- [4] 安振武. 基于振动的导管架平台结构健康监测技术研究[J]. 天津科技, 2018, 45(6): 41-45.
- [5] 徐志毅, 陈波, 张勇. 海洋导管架平台结构极限强度分析方法[J]. 中国海洋平台, 2018, 33(1): 79-84.
- [6] American Petroleum Institute (2014) API Recommended Practice 2A-WSD: Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design. 22nd Ed., API Publishing Services.
- [7] 深水导管架结构分析技术指南 2023 中国船级社[EB/OL].  
<https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=202302141059602226>, 2025-08-30.
- [8] Det, N.V. (2017) DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads.  
<https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-c205-environmental-conditions-and-environmental-loads/>
- [9] 中国海洋石油总公司工程技术分公司. 固定式导管架结构可靠性分析及应用指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.