

无人平台与可移动栈桥相对位移研究

Research on the Relative Displacement of Unmanned Platform and Movable Trestle

李丙焱 刘传彬 孟庆鹏 刘春 程宇

Bingyan Li Chuanbin Liu Qingpeng Meng Chun Liu Yu Cheng

中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司 中国·天津 300452

CNOOC Energy Development Co., Ltd. Oil Production Services Branch, Tianjin, 300452, China

摘要: 在海洋油气传输与处理时,井口平台需通过可移动栈桥与移动平台进行连接。受载荷影响,工作过程中两平台会产生相对位移,栈桥作为两个平台的连接部分,需要承受平台之间的相对位移,平台之间的相对位移大小决定了栈桥的设计。论文通过对栈桥与平台之间最大相对位移量研究,得出平台在各工况下的相对位移规律,为栈桥的设计提供理论基础。

Abstract: When transporting and processing offshore oil and gas, the wellhead platform needs to be connected to the mobile platform through a movable bridge. Due to the influence of load, there will be relative displacement between the two platforms during the working process. As the connecting part of the two platforms, the trestle needs to withstand the relative displacement between the platforms, and the magnitude of the relative displacement between the platforms determines the design of the trestle. The paper studies the maximum relative displacement between the trestle and the platform, and obtains the relative displacement laws of the platform under various working conditions, providing a theoretical basis for the design of the trestle.

关键词: 井口平台; 栈桥; 相对位移; 工况

Keywords: wellhead platform; atrestle bridge; relative displacement; load case

DOI: 10.12346/etr.v5i6.8226

1 引言

海洋油气装备主要包括海洋勘探装备、海洋钻井装备、海洋施工装备、海洋油气生产装备等类型,涉及海洋油气开发的全流程各环节,是集安装建造、浮体结构、信息及新材料等高新技术的综合体,是多领域融合、多学科交叉的系统工程^[1]。

近年来中国在智能化油气开发取得突破,随着海上油气田在传统模式下降本增效空间的不断压缩,为了进一步降低桶油成本,提高生产运营效率,许多油井采用无人井口平台进行开采。无人平台可以减少生活区模块设计制造,降低平台整体建造成本投资;无须人员长期驻守,降低运营维护成本,提高人身安全;保障油田的生产和台风季节油田生产的不间断,从而增加了经济效益引领海上油气田管理转型,推动可持续性发展^[2]。

2 平台设计载荷

平台在海上作业时会承受各种载荷,本文根据某井口平台作业时承受载荷进行研究。海洋平台作业时承受各种外部载荷,论文计算时采用设计水深为 24.1m,重现期分别选择 1 年一遇与 50 年一遇。平台所受外载荷有波浪载荷;海流载荷;风载荷;海冰载荷以及平台上各区域的活动载荷。

除外部载荷外,平台导管架结构自重包括导管架结构中所有主要构件、次要构件和附属构件的自重;海洋生物的自重及设备荷载的影响。

3 平台建模

论文使用 Bentley 公司的商业化分析软件 SACS 进行建模分析。为使计算模型与实际结构尽量相似以使计算结果反映平台实际受力状态,将平台结构所有主要受力构件都按照实际尺寸和布置情况输入计算模型,具体包括以下结构:下

【作者简介】李丙焱(1981-),中国河北保定人,本科,从事海上平台设备管理及技术管理发明研究。

部结构（导管架）和上部组块主要支撑构件、各层甲板等。其他的附属构件则以节点荷载或者均布荷载的形式施加相应的重力^[3]。

在对桩基础的模拟方面，泥面以上作为空间刚架，泥面以下则用 SACS 程序的“桩土交互作用”分析模块（PSI）进行处理，考虑了下部结构与桩基的相互作用以及土壤的非线性特性。

利用 SACS 软件建立的海上升压站 3D 模型，包括以下几个部分：①导管架的主要支撑构件；②上部组块主要支撑构件；③模拟由波浪，潮流，自重和浮力产生的结构杆件荷载；④利用 P-Y 和 T-Z 土曲线模拟结构—土壤非线性特性。桩基础模拟考虑了桩土相互作用的非线性效应，根据设计桩的入泥深度、桩的尺寸和土壤资料等数据模拟桩土模型。平台具体计算模型如图 1、图 2 所示。

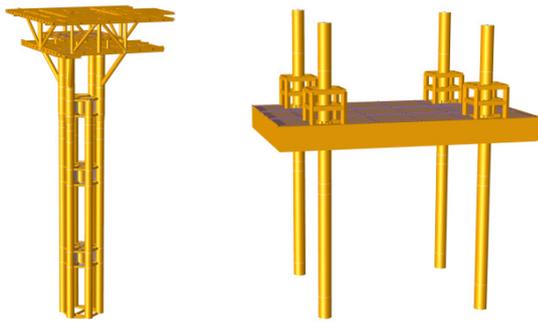


图 1 井口平台计算模型 图 2 移动平台计算模型

当平台有限元模型中考虑桩腿与土壤的相互作用时，桩腿与土壤间的弹性支撑约束可按下列 3 个方向的刚度系数来进行考虑：

$$K_1 = \frac{2G_v B}{1-\nu}; \quad K_2 = \frac{16G_h B(1-\nu)}{7-8\nu}; \quad K_3 = \frac{G_r B^3}{3(1-\nu)} \quad (1)$$

其中， K_1 、 K_2 、 K_3 分别为垂向、水平和转动刚度系数， G_v 为针对垂向荷载的土壤剪切模量； G_h 为针对水平荷载的土壤剪切模量； G_r 为针对转动荷载的土壤剪切模量； B 为桩靴和土壤接触的承载面的最上部分的有效直径（对于矩形桩靴， B 为宽度）； ν 为泊松比^[4]。

转动刚度系数 K 需通过如下的迭代计算过程来进行确定：

采用 $K_1 = \frac{2G_v B}{1-\nu}$ 、 $K_2 = \frac{16G_h B(1-\nu)}{7-8\nu}$ 、 $K_3 = \frac{G_r B^3}{3(1-\nu)}$ 作为初始弹性刚度应用于平台模型中，分析平台在重力、环境力及惯性力作用下的响应；

由上述（1）计算得到桩脚三个方向的反力，即垂向力 Q_v 、横向力 Q_H 和旋转力矩 Q_M 后，代入下面的 F_y 公式中进行分析，如果 $F_y < 0$ ，则减小旋转刚度，重复对模型进行计算：

$$F_y = 16 \left[\frac{Q_v}{V_{L0}} \right]^2 \left[1 - \frac{Q_v}{V_{L0}} \right] \left[\left[1 - \frac{Q_v}{V_{L0}} \right] - \left[\frac{Q_H}{H_{L0}} \right]^2 \left[\frac{Q_M}{M_{L0}} \right]^2 \right] \quad (2)$$

其中， V_{L0} 为预压载时单桩最大垂向荷载。

对于砂土： $H_{L0} = 0.12V_{L0}$ ； $M_{L0} = 0.075V_{L0}B$ (3)

对于粘土： $H_{L0} = c_{u0}A + (c_{u0} + c_{u1})A_s$ ； $M_{L0} = 0.1V_{L0}B$ (4)

其中， c_{u0} 为最大承载面（泥面以下 D ， D 为从泥面到桩靴最大承载面的距离）处的土壤不排水粘性剪切强度； c_{u1} 为桩靴最底部处的土壤不排水粘性剪切强度； A 为桩靴有效承载面积，取桩靴和土壤接触的承载面的最上部分的横截面的面积； A_s 为桩靴埋深区域的侧向投影面积^[5]。

重复（2）的计算，直到平台每个桩靴计算得到的 $F_y > 0$ ，如果 Q_M 减小到零，值 F_y 仍小于零，则此计算失败。

如果（1）中首次计算得到的（ Q_v ， Q_H ， Q_M ）即让 $F_y > 0$ ，则最终应用于平台模型中的转动刚度 $K_3 = f_r \frac{G_r B^3}{3(1-\nu)}$ ，即乘以刚度减小系数 f_r 进行修正：

$$f_r = \sqrt{(1-r_f) + 0.1e^{100(r_f-1)}} = \frac{\left\{ \left[\frac{Q_H}{H_{L0}} \right]^2 + \left[\frac{Q_M}{M_{L0}} \right]^2 \right\}^{0.5}}{4 \left[\frac{Q_v}{V_{L0}} \right] \left[1 - \frac{Q_v}{V_{L0}} \right]} \quad (5)$$

当 $f_r > 1$ 时，表明依据（ Q_v ， Q_H ， Q_M ）即让 $F_y < 0$ 。

两平台在荷载作用下发生偏移，相对位移的参考点分别取井口平台的点 B001 和移动平台的点 B002。两平台就位相对位移参考点如图 3 所示。

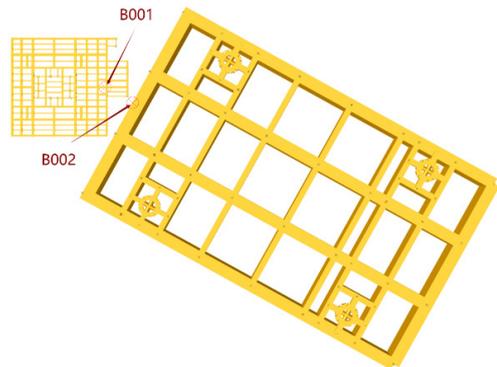


图 3 两平台就位相对位移参考点

4 计算工况

进行在位分析时应考虑了 12 个方向的同向环境荷载（风、浪、流、冰）。在位分析除考虑操作工况外，考虑了极端工况。考虑波浪荷载时应在规定的波浪周期、方向角和水位范围内考虑最大值，波浪相位角选取分别考虑达到最大地基剪力和最大倾覆力矩两种情况。

荷载工况考虑恒载、活载、操作情况及极端情况下的风浪流荷载。其中，恒载考虑不同水位下浮力的影响，以及富余质量对结构的影响。风浪流荷载考虑 12 个方向作用的影响。平台实际所受工况将由基本工况组合而成，在位分析工况包括操作工况、极端工况等，通过计算得出不同工况下两平台的相对位移。组合工况见表 1。

表1 组合工况

Load case	Combined load condition description
E01~E12	DE1*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.1+APP*1.1+LIVE*0.75+EH01~EH12*1.0
E21~E32	DE2*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.1+APP*1.1+LIVE*0.75+EL01~EL12*1.0
E41~E52	DE1*1.1+DRI*1.0+EQUW*0.75+APP*1.0+LIVE*0.25+EH01~EH12*1.0
E61~E72	DE2*1.1+DRI*1.0+EQUW*0.75+APP*1.0+LIVE*0.25+EL01~EL12*1.0
O01~O12	DE3*1.1+EQU*1.0+EQUW*1.0+DR*1.0+APP*1.0+LIVE*1.1+OH01~OH12*1.1
O21~O32	DE4*1.1+EQU*1.0+EQUW*1.0+DRI*1.0+APP*1.0+LIVE*1.1+OL01~OL12*1.1
O41~O52	DE3*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.1+APP*1.0+LIVE*1.1+OH01~OH12*1.1
O61~O72	DE4*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.1+APP*1.0+LIVE*1.1+OL01~OL12*1.1
OI01~OI12	DE3*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.0+APP*1.0+LIVE*1.0+PH01~PH121.1+IF01~IF12*1.1
OI21~OI32	DE4*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.0+APP*1.0+LIVE*1.0+PL01~PL121.1+IF21~IF32*1.1
EI01~EI12	DE3*1.1+DRI*1.0+EQUW*0.5+APP*1.0+LIVE*0.25+IH01~IH121.0+IF01~IF12*1.0
EI21~EI32	DE4*1.1+DRI*1.0+EQUW*0.5+APP*1.0+LIVE*0.25+IL01~IL12*1.0+IF21~IF32*1.0
EI41~EI52	DE3*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.0+APP*1.0+LIVE*0.75+IH01~H12*1.0+IF01~IF12*1.0
EI61~EI72	DE4*1.1+DRI*1.0+EQUW*1.0+APP*1.0+LIVE*0.75+IL01~L12*1.0+IF21~IF32*1.0

5 结果分析

对各个组合工况进行分析计算，得出井口平台的 B001 和移动平台的 B002 两点的相对位移，计算结果如图 4~ 图 7 所示。

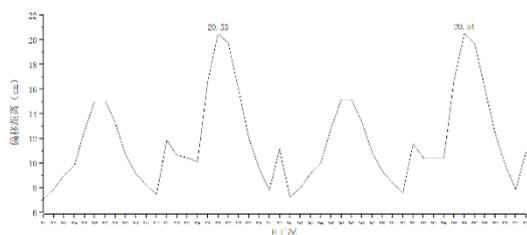


图 4 E 工况相对位移图

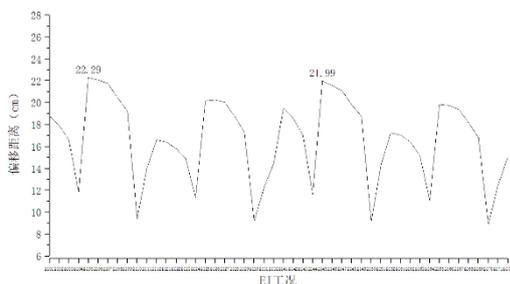


图 5 EI 工况相对位移图

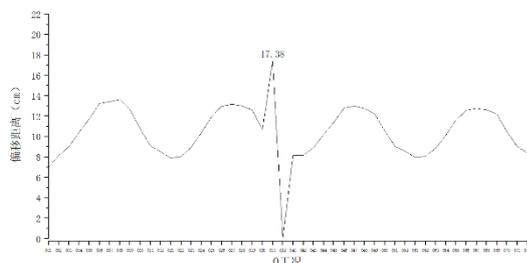


图 6 OI 工况相对位移图

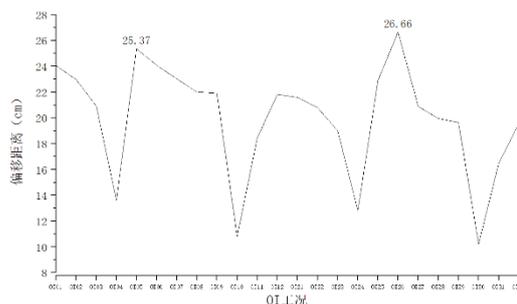


图 7 OI 工况相对位移图

由图 4 可知水位高低对平台相对位移影响较大，且低水位较高水时平台相对位移更大，对比 E、O 工况与 EI、OI 工况可知冰载荷较浪载荷平台之间的相对位移更大。平台之间的最大位移出现在工况 OI26，最大位移为 26.66cm。

参考文献

- [1] 何骁勇,徐正海,张颖等.海上智能油气田发展现状及趋势[C]//长安大学智慧油气田研究院 (Research Institute on Wisdom Oil & Gas Field, Chang'an University),长安大学数据实验室与研究中心 (Data Science Laboratory and Research Center, Chang'an University),中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司信息化管理中心 (Information Management Center.第七届数字油田国际学术会议论文集.[出版者不详],2021:250-255.
- [2] 夏如君.5G赋能海上无人值守平台[J].电信科学,2021,37(7):148-154.
- [3] 姚艳萍,林钟明,李林斌.导管架平台的结构静力分析[C]//中国造船工程学会近海工程学术委员会.2009年度海洋工程学术会议论文集(上册).《中国造船》编辑部,2009:331-336.
- [4] 杨冬平.海洋导管架平台安全数字化技术研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
- [5] 李红涛,李晔.自升式海洋平台地基强度稳定性分析[J].海洋工程,2011,29(1):105-110.