

深海平台分析和设计中的关键力学问题

曾晓辉¹, 沈晓鹏¹, 吴应湘¹, 刘杰鸣²

(1. 中国科学院力学研究所 工程科学研究部, 北京 100080; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘 要: 深海采油平台与传统的导管架平台有很大不同, 主要体现在动力响应、主要结构件形式、主要结构块之间的连接方法和分析方法方面。文章对深海平台的上述特点作了评述, 并根据初步的数值分析结果指出: 现有的商业软件并不能完全解决深海平台设计中的问题, 其中还有很多需要深入研究的内容。

关键词: 海洋工程; 深海平台; TLP; SPAR; 水动力; 断裂; 疲劳

中图分类号: U674.38⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2005) 05-0018-04

Key Mechanical Problems in Analysis and Design of Deep-sea Platform

ZENG Xiao-hui¹, SHEN Xiao-peng¹, WU Ying-xiang¹, LIU Jie-ming²

(1.Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China; 2.China Offshore Oil Research Center, CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: Deep-sea platform is very different from jacket platform. The primary differences are the dynamic response, the main structure members, the method of connection between main structural models and the analyzing method. In this paper, the characteristics of deep-sea platform above mentioned are reviewed. More, based on the preliminary numerical study, the authors indicate that the existing commercial software cannot solve all the problems encountered in the process of design. There are many open questions that require a study in-depth.

Key words: offshore engineering; deep-sea platform; TLP; SPAR; hydrodynamics; fracture; fatigue

1 引言

最近几年, 我国海上石油开采已从近海浅水走向深海。未来 5 年~10 年内, 我国海洋石油的开采水深有望达到 500 米~2000 米。由于导管架平台和重力式平台自重和工程造价随水深大幅度增加, 已经不能适应深水海域油气开发的要求。因此, 研究、发展深海采油平台的有关技术势在必行。

张力腿平台 (TLP) 和 SPAR 平台是典型的深海平台, 国外大型石油公司在墨西哥湾和北海已经建造了若干座, 但我国还没有建造和使用的经验^[1,2]。这两种平台有很多优点, 因此已成为我国深海石油开发计

划中重点考虑的候选平台型式。本文将从动力响应、结构强度和疲劳等方面对这两种平台的特点和研究方法作一简要评述。

2 深海平台的整体结构和动力响应

TLP 和 SPAR 主要由顶部模块、小水线面浮体、系泊系统、基础和立管等五部分组成 (如图 1 所示)。在水平面内, 它们可以有相对较大幅度的运动; 而在铅垂面内, 则运动幅度较小。这种结构使其动力特性既不同于传统的刚性固定式平台 (导管架或重力式平台), 也不同于顺应式的船舶和 FPSO。

收稿日期: 2005-04-21; 修回日期: 2005-07-22

项目性质: 中国科学院知识创新工程 (KJCX2-SW-L03) 国家高技术研究发展计划 (“十五” 863 计划海洋资源开发技术主题 2004AA617010) 资助项目。

作者简介: 曾晓辉 (1972-), 男, 副研究员, 主要从事海洋与船舶结构物动力响应、强度、疲劳等方面研究。

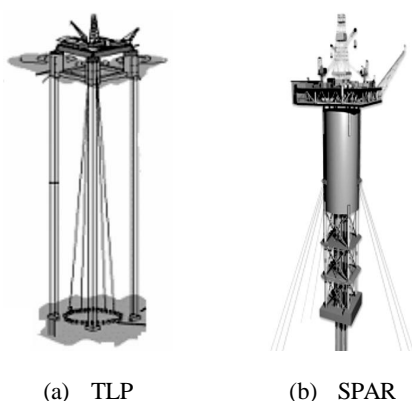


图1 TLP 和 SPAR 的整体结构示意图

TLP 的浮体主要由圆柱形（或矩形）的立柱和沉箱组成，浮体提供的浮力大于平台自重，因此作为系泊系统的张力腿总是处于受拉的绷紧状态。这种结构使平台在铅直面内有很大的刚度，而在水平面内刚度相对较小。与此对应，TLP 在铅垂面内运动（垂荡、横摇、纵摇）的固有周期为 2 秒~4 秒，在水平面内运动（纵荡、横荡、首摇）的固有周期为 1 分钟~2 分钟^[1]。TLP 的稳定性主要由绷紧的张力腿系统来保证，水线面变化产生的回复力矩对稳定性贡献相对较小。

SPAR 是一种“桅杆”式的平台，结构较简单，浮体仅由一个深吃水的圆柱体（吃水比 TLP 深）组成，该圆柱体提供全部浮力（圆柱体的吃水可以随工况不同而改变）。在圆柱体表面散布着多个半张紧的钢悬索系泊链，这些系泊链构成 SPAR 的系泊系统。由于系泊链倾斜且数目较多，因此 SPAR 在水平面内的刚度大于 TLP，其面内运动位移（纵荡、横荡）也小于 TLP。此外，SPAR 的系泊索不需要负担多余的浮力，且稳定性也不需要系泊系统保证。SPAR 本身很低的重心和较高的浮心足以保证平台的稳定性。上述特点使 SPAR 垂向运动的固有周期与 TLP 不同：垂荡运动为 25 秒~28 秒，纵摇和横摇为 50 秒~80 秒。由于浮体是圆柱形的，因此 SPAR 的首摇可以忽略^[3]。

深水平台的动力响应按照频率范围可大致分成三种：波频响应、低频响应和高频响应。

1) 一阶波频响应

这是进行海洋浮式结构性能分析时必须考虑的一种基本的运动响应。考虑不同情况，对 TLP 和 SPAR 进行水动力分析时可分别采用 Morison 公式或辐射/绕射方法。当满足 $D/\lambda < 0.2$ （ D 为圆柱直径， λ 为波长）时，可采用 Morison 公式求解波浪力；否则，需采用

辐射/绕射方法。在采用辐射/绕射方法理论时，根据分析对象的具体情况不同，可以分别利用解析方法或基于 Green 函数的面元法（边界元法）。对于形状规则的结构物（如圆柱体），解析方法有优势；如结构形状不规则，则需采用面元法或解析法与面元法的结合。

2) 二阶差频、和频响应

由于自由表面的非线性性质，海洋结构物在海浪中的运动实质上是一个非线性问题，而在进行波频响应分析时，只是在线性化的条件下求解。实际观测表明，系泊在海中的海洋结构物除了产生波频运动外，还伴随有明显的二阶非线性运动，包括平均漂移、长周期慢漂（差频运动）、弹振（和频运动）。这些二阶运动与波频运动是不同的，性质也不一样，用线性理论不能解释。对于系泊在海中的浮式结构物，必须考虑二阶运动对结构物的强度、疲劳寿命的影响。对于 TLP，和频和差频运动都可能发生；对于 SPAR 来说，差频运动更为明显。

3) 更高频脉冲响应（鸣振，即 ringing）

主要在风暴海况下，TLP 会出现 ringing 响应，表现为张力腿的张力突然增高，而且衰减较慢，就像教堂的钟声一样。虽然也有学者对鸣振进行了研究，但目前对其机理的研究还没有得到公认的结果。

3 深海平台的局部结构、强度和寿命

深海平台的本体主要由较大直径的加筋圆柱及加筋板构成，这与导管架平台有很大不相同。本体结构中的加强筋使 TLP 和 SPAR 的强度分析变得复杂，而且还会引入一些固体力学中很棘手的问题，例如加筋圆柱壳的屈曲。这一问题虽然研究历史悠久，但目前仍是一个较活跃的研究领域。

深海平台各主要模块之间的连接方式与导管架平台也有很大区别。导管架平台通常把各部分牢固焊接起来，而 TLP 和 SPAR 却不是这样。浮体与系泊系统之间、系泊系统与基础之间的连接通常允许有一定的相对转动，就好像关节一样，如图 2 所示。这种连接方式也是为了适应深海平台相对较大的运动，体现了其顺应式平台的特点。

还需要予以重视的就是断裂分析。对一些关键点进行断裂分析不仅有助于疲劳寿命的估算，而且也作为定期检测和长期监测提供了力学依据。为在保证精度的同时减轻断裂分析的工作量，可将解析法和有限元法结合使用。



图 2 深海平台的活动连接

深海平台疲劳寿命的研究方法与导管架平台有很大不同.分析导管架平台的疲劳寿命时,一般将其视为线性系统,通过动力或准静力分析求得传递函数,利用谱分析方法就可求得应力范围的功率谱密度.由于海浪是平稳正态的随机过程,导管架平台是线性系统,因此平台结构内的交变应力过程也是平稳正态的.求得应力范围的功率谱密度后,应力过程的统计特征就完全确定了,进一步可很容易进行疲劳可靠性分析.深海平台的疲劳分析则远没有这么简单.由于二阶或更高阶的非线性运动不能忽略,所以不能将深海平台看作线性系统,它的疲劳寿命分析必须建立在充分考虑非线性波浪载荷的基础上.将通常的以线性系统变换为基础的疲劳可靠性方法用于深海平台并不妥当.

4 深海平台的涡激振动

在适当条件下,TLP的张力腿会发生涡激振动.涡激振动又分为横向振动(垂直流向)和线内振动(顺流向)两种,顺流向的共振临界约化速度低于横向的值,不过发生线内振动时的振幅比横向振动小一个数量级.目前已有许多学者从理论和实验两方面对涡激振动进行了分析,但至今仍未完全解决这一问题.分析涡激振动的数学模型有多种,其中主要有尾流振子模型和相关模型.两者最明显的区别在于:尾流振子模型假设旋涡的形成和脱落是二维的;而相关模型认为旋涡形成和脱落具有三维特性,流态沿柱体轴线方向是相关的.由于问题很复杂,所以目前工程上常采用设计时避开涡激振动频率,使用抗流装置、破坏旋涡形成等方法来处理.

在一定的条件下,SPAR的圆柱形浮体也会发生涡激振动.通常采用在SPAR浮体表面安装螺旋形箍

带或张紧系泊系统的方法来抑制涡激振动及锁频现象的发生^[3].TLP的浮体一般不发生涡激振动,因此其上不用装箍带.

5 深海平台的分析方法

导管架平台的波浪载荷可以完全由波浪场确定,与平台响应无关.深海平台情况则完全不同.TLP和SPAR的载荷和平台动力响应是耦合的,不能分开求解,这显然大大增加了分析难度,其中还有许多理论问题没有解决.虽然国外不少研究单位开发了相关分析软件,但这些软件主要在线性范围内进行分析.即使是线性分析,不同研究机构给出的结果也有较大差别(趋势相同,数值差别较大).由于线性解的差别就较大,因此在其基础上给出的二阶解差别更大.

笔者在时域中开展了张力腿式圆柱体的非线性动力响应分析^[4],分析中考虑了有限位移、瞬时湿表面、粘性力等非线性因素.初步分析表明,非线性因素对动力响应影响明显.如图3所示,分析中考虑有限位移和转角会使张力腿式圆柱体的位移响应与线性分析得到的结果显著不同.图3中曲线1、2、3、4分别是波高4米、波浪角45度时的纵荡和横荡响应,所不同的是,曲线3、4考虑了非线性位移.曲线5、6、7、8是波高为6米时的对应情况.其他4个自由度情况类似,详见文献^[4].从图中可看出,考虑有限位移这种非线性因素后,响应有显著改变.因此在研究深海平台时,应该考虑非线性因素的影响.

国外公司在进行工程设计时,一般采用商用软件(线性分析和二阶频域解)加上大量试验的办法.线性分析结果和实际情况相差较远;即使综合考虑线性解和二阶频域解也难以完全解释实验结果,这又影响了实验结果的使用.由于许多非线性因素没有考虑或只是部分计入(例如,有限位移、瞬时湿表面等),因此实际设计做得很保守(有的平台安全因子甚至大于10).这种做法代价高昂,会使一些储量并不太丰富的油田(我国有许多这种油田)失去开采的经济价值.况且,人为增大安全因子随意性较大,不利于提高设计水平.

我国未来进行深海平台设计时,需注意国外商用软件的局限性.要避免陷入完全依赖国外软件的误区中.应该认识到:现有的商业软件并不能完全解决深海平台设计中的问题(各种软件持续不断的升级就是自身不完善的一种反映).商用软件友好漂亮的界面、美观的图形化显示并不代表它给出的工程设计方案也是

完美的、合理经济的强度（及疲劳）分析和设计应该建立在理性准确的非线性动力响应和载荷分析的基础上，而这正是现有商用软件所欠缺的。如果能用更为准

确的分析方法来代替一部分试验，用更完备的理论来预测平台的响应和寿命，则必将大大降低平台的设计、建造和运行成本。

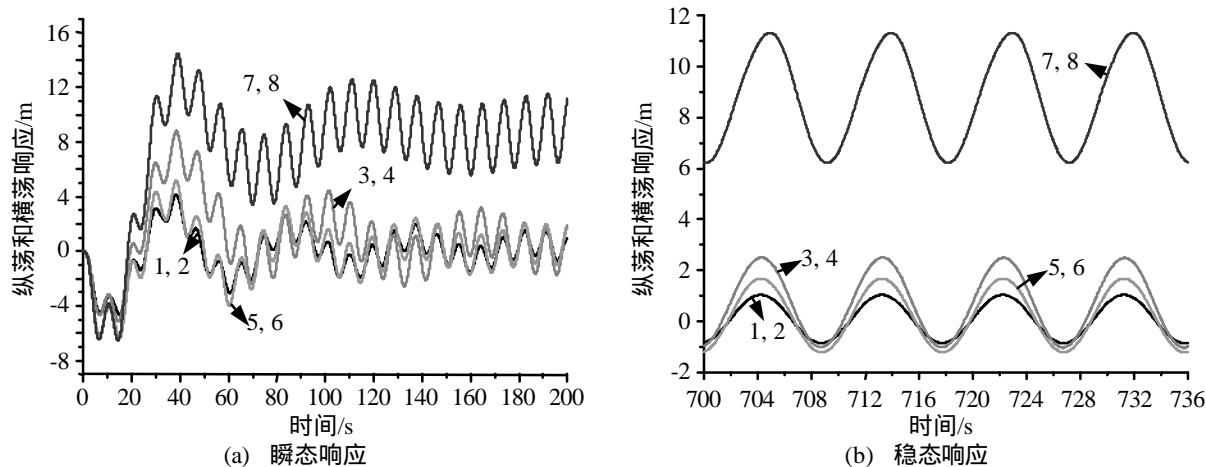


图3 张力腿式圆柱体的纵荡和横荡（波向角45度）

6 结语

本文分别介绍了深海平台的结构、动力响应、强度、疲劳寿命及涡激振动等关键问题，并对有关分析方法作了简要评论。最后指出，国外商用软件有自身的局限性，并不完善，我国深海平台设计不能过度依赖这些软件。

参考文献：

[1] 曾晓辉，沈晓鹏，徐本和，吴应湘. 张力腿平台的水动力及结构力学问题[J]. 中国造船，2003，44（增）：

429~433.

[2] 吴应湘，李华，曾晓辉. 深海采油平台发展现状和设计中的关键问题[J]. 中国造船，2002，43（增）：80~86.

[3] 徐琦. Truss Spar 平台简介[J]. 中国造船，2002，43（增）：125~131.

[4] Zeng Xiaohui, Shen Xiaopeng, Wu Yingxiang. Nonlinear dynamic response of floating circular cylinder with taut tether[A]. Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference[C], Vol.1:218~224, 2005.

第十四届 JECKU 会议在杭州举行

在9月9日召开的第十四届日、欧、中、韩、美造船企业高峰会议（JECKU会议）预备会上，基本确定了于10月12~14日在杭州举办的第十四届 JECKU 会议的所有议程。

根据本届 JECKU 会议的议程安排，与会各方代表将就11项议题进行研讨，其中的热点有市场统计数据、市场走势分析、船市需求预测、OECD 造船协定、造船成本上升告示。与会各国专家将重点分析世界经济及航运市场的走势；公布不同地区造船业手持订单量、造船完工量、新承接订单量，以及目前各船型的新船订单量和船队比例等统计数据；预测各船型的市场走势，同时就 OECD 造船协定，原材料、劳动力涨价对造船成本的影响，发展船厂与船级社之间的关系，全球造船能力等问题进行讨论。目前，中国代表确定的发言主题为“中国的经济增长及其海运贸易”、“世界航运发展对船舶产品的新需求”等。

这是我国自2002年参加 JECKU 会议以来，首次作为东道主国举办会议。会议将由中国船舶工业行业协会主办，来自日、欧、中、韩、美五方船舶行业协会及主要造船企业的代表80余人将出席会议。中方出席会议的主要代表为中国船舶工业行业协会以及中国船舶工业集团公司、中国船舶重工集团公司和中远工业公司。届时，中国船舶行业协会将作大会主题发言，3家企业代表将分别作专题发言。