

文章编号: 1001- 4500(2000)02- 0012- 04

深水张力腿平台设计中的流体动力学问题

吴应湘 郑之初 李东晖 马艺馨 劳力云

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要: 从流体力学的角度介绍了深水海洋资源开采所需的主要平台形式—张力腿平台结构设计中遇到的流体动力学问题, 探讨了张力腿平台部件设计对线性外载、低频外载、高频外载和海流外载的依赖程度, 以及流体力学领域应该重点研究的问题。

关键词: 张力腿平台 流体力学 深海

中图分类号: P752

文献标识码: A

1 引言

50 多年来, 适合于近海浅水作业的导管架式平台技术已相对成熟。但随着海洋开采的日益扩大, 深水海洋平台的建立便越来越受到重视。70 年代前, 海洋油气开采平台仅建在低于 100m 水深的海域, 80 年代初, 水深达到 300m。1986 年后, 由于石油价格猛跌, 给海洋油气开采事业带来很大冲击。而能源危机的大趋势仍然要求并促进了海洋开采技术的发展, 特别是边际油田和深水油田开采技术的发展。但如何降低平台造价, 使平台能重复使用成为海洋工程领域面临且必须解决的重大关键技术问题。张力腿平台(TLP: Tension Leg Platform)正是在这种环境下产生并不断发展的一种新型油气开采技术。

TLP 保留了固定平台的许多优点, 可将浅水平台的许多成熟的生产技术直接移植到深

水, 并能降低平台在深水海域的造价。它通过充分利用浮力让平台腿受到预张力, 使平台主要处于受拉状态, 从而有效地控制了平台的垂直位移, 并能使水平位移大大小于浮式生产系统, 保证平台在海洋环境中的安全。

由于 TLP 技术的复杂性, 以及其关键技术尚不成熟且因投产不久, 尚未经过时间和严峻海洋环境的考验, 致使目前国际上尚无公认的设计规范。因此针对 TLP 的技术难点, 正大规模地开展研究工作。

从国际学术界的注意力和学术活动看, TLP 研究越来越占有重要的地位。海洋工程界和权威杂志 TJOPE, AOE 上有关顺从式结构的技术问题, 浮式生产系统的载荷、动力响应, 慢飘阻尼与短峰波联合概率分布对顺从式结构设计的影响等内容文章数量不断增加。国际学术会议 OTC, ISOPE 均专门为张力腿平台的研究开设分会场, 进行专题讨论, 内容包括: 动力响应时域、频域分析方法, 张力腿平台的高频响应与慢飘运动, TLP 系统的随机非线性响应, TLP 壳体拉杆的动力响应及控制, 和 TLP 拉杆的动态响应计算与试验, 深海土的动态特性, 吸力式基础承载力与变形分析技术, 吸力式基础上浮控制技术等等。重点是结构对环境载荷的非线性响应, 强度与疲劳计算以及基础的稳定性。这些问题只有通过不同学科的合作研究, 细致的试验和现场观测来解决, 并在此基础

收稿日期: 1999-11-26

作者简介: 吴应湘(1956-), 男, 博士, 研究员。

基金项目: 中国科学院“九五”重大项目(KZ951- A1- 405)



上逐步形成实用的设计规范。其中流体外载是结构设计的前提和条件,加之流体外载本身的复杂性,使该问题成为 TLP 设计中首先必须重点研究的问题^[1]。本文从流体力学的角度描述了 TLP 设计中遇到的流体动力学问题, TLP 部件设计对线性外载、低频外载、高频外载和海流外载的依赖程度,以及流体力学领域应该重点研究的问题。

2 平台的流体外载

与导管架平台不同, TLP 的流体外载的主要部分不是由 Morison 公式计算的忽略结构物的阻力载荷和惯性力载荷,而是由波浪与平台外缘的绕射作用和辐射作用决定的阻力载荷和惯性力载荷。绕射理论和辐射理论描述了 TLP 对 6~20s 的波浪载荷的线性响应过程,可用大型有限元或有限差分求解积分方程得到载荷的大小,只是处理非线性边界条件时要非常小心。同时还必须用 Morison 方程考虑正比于波高平方的阻力项。

3 平台的低频响应

流体动力的高阶载荷主要体现在平台对风、浪、流的低频响应和高频响应方面,下图给出平台响应六个分量的示意图。

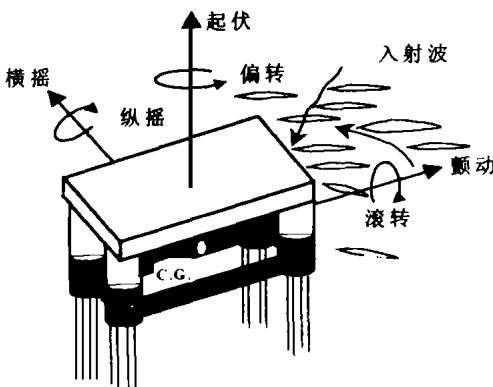


图 张力腿平台承受流体高阶外载示意图

平台的低频(差频)响应是指周期在 80s 以上的流体外载。风、波移和海流影响一般在这个范围。它们在自由模式下诱发平台的颤动

(Surge)、横摇(Sway)和偏转(Yaw)。与海浪相比,风、波移和海流对载荷的影响不是太大,但若它们的频率接近 TLP 的共振频率时,载荷的放大效应必须引起重视。

波移是波浪二阶以上的非线性效应,计算起来比线性理论要困难得多。实际表明,漂移力在很大程度上依赖于流速,因此,波流耦合效应是研究平台低频响应的主要问题。

通常情况下,风对 TLP 的载荷和位移影响并不显著,但强台风的影响确不能低估,有时会对 TLP 造成灾难性后果。目前都用谱方法来描述风,如 Davenport 谱, Harris 谱, Janswap 谱等,在我国渤海,文圣常谱比较准确,对南海,尚无较好的谱模式,有人建议用 Pierson - Moskowitz 谱,但该谱的准确程度还有待验证。另外,风力计算依赖于风力系数,风力系数又依赖于结构形状,所以必须通过风洞实验来确定风力的大小。

4 平台的高频响应

平台高频响应的外载周期在 1.8~4s 范围,属流体载荷的合频效应(Springing and Ringing)。它们诱发 TLP 的起伏(Heave)、滚转(Roll)、和纵摇(Pitch)的强迫振动。高频载荷主要来自于绕射理论的二阶非线性效应和突发性共振的水动力载荷。国外一些研究机构试图用二阶力转换函数理论来计算绕射理论的二阶非线性载荷,该方法距实际应用尚有一定距离。海洋中突发性共振的产生原因目前尚不清楚,根本谈不上如何计算。现在有些国家已将其作为国家级重大科研项目进行专门研究。

5 张力腿的流固耦合效应

由于张力腿很长,属柔性结构,它一方面限制平台的起伏、滚转和纵摇,另一方面,又受平台起伏、滚转和纵摇的反作用在水中产生大的位移,所以计算它的流体载荷时,必须考虑它的流固耦合效应。近年来,国外对锚链等柔性结构物的水动力影响做了大量工作,国内这方面的

工作才刚刚起步,仅限于对锚链的动力分析或对张力腿的静力分析,需要加强这方面的研究。张力腿承受的最大张力和疲劳主要来自于高频载荷,所以计算流固耦合的非线性效应将成为 TLP 水动力研究的重要课题。

6 深水环流对 TLP 的影响

在深水中,由于洋流的影响,可能出现对深水结构物产生很大影响的环流。环流产生并释放大尺度旋涡随洋流一起运动,对 TLP 的正常操作会带来威胁;同时,由于环流影响,深水流速反而会大于表层流速,进而直接影响到深水结构物的安全性和稳定性。另外,由于环流会产生竖直运动的旋涡水柱,它所诱导的涡动力行为对 TLP 的影响将是非常严重和复杂的。目前深水环流问题已引起国外工程部门和研究部门的广泛重视,但由于研究它需要很多深海环境的实测水文数据,所以研究起来难度很大。

7 海洋内波对 TLP 的影响

由于海洋中温度层或密度层的影响会在深水中形成海洋特低频波(这里指的周期从5分至数小时的内波、孤立波和流的脉动)和低频波(这里指的是15秒至5分周期的长波)。这种特低频波和低频波将对张力腿产生严重的耦合作用,进而影响到平台的安全性和稳定性。海洋内波对海洋工程结构物的影响也已经引起各国海洋石油公司的广泛重视。但目前对海洋内波的调查和监测尚有待完善,海洋内波的形成机理、运动规律和对结构物作用的计算方法需要进行深入细致的研究。

8 TLP 设计中的其它流体载荷问题

8.1 地基设计

由于平台的起伏、滚转和纵摇,张力腿的地基结构将承受拉、压、剪、扭、弯等各种不同性质的载荷,地基设计要能承受这些力的作用。这是一个土力学、结构力学和流体力学的综合性研究课题。首先要求流体力学工作者给出各种复

杂水动力环境下波浪、海流作用在张力腿和基础结构上的流体外载,以及海底的波、流对地结构的淘蚀影响。

8.2 气隙

气隙是指波峰与甲板间的距离,极限波条件下正的气隙是设计的基本要求。气隙主要由波浪的不对称性, TLP 大的位移,波浪的绕射、碰撞引起的波峰的提高,以及二阶波和流的上涌影响等因素决定。由于甲板的竖向位置主要由气隙决定,因此正确计算气隙显得非常重要。

8.3 平台外形设计

线性波浪力和相应的惯性力是平台外形设计的主要依据。同时还应考虑到突发性共振载荷,来源于加速度的惯性力,以及高频载荷产生的疲劳效应。

8.4 人员舒适感

竖向与水平加速度以及突发性振动直接影响到人员的舒适感,特别是当 TLP 的起伏、滚转和纵摇周期大于4s后,突发性振动对人员舒适感的影响将是非常严重的。

此外, TLP 的安装过程、操作过程、张力腿弯曲角等方面也遇到各种各样的水动力问题,需要进行流体力学方面的研究。

9 TLP 部件设计对流体载荷的依赖程度

为了明确地看出流体载荷对 TLP 部件的影响情况,表1中列出了 TLP 部件设计时对流体的线性外载、低频外载、高频外载和海流外载的依赖程度。

10 TLP 流体外载的重点研究课题

前面介绍了 TLP 设计中涉及到的一些主要的流体力学问题,这些问题有的已经有比较成熟的理论和处理方法,并且已被工程部门采用,有些属于研究部门已经或正在解决的问题,有待于工程部门的认可和应用,还有些属于研究部门的新课题,有待于深入细致的研究。特别是那些 TLP 设计中非常需要而又未解决的课

题, 应该及时投入人力、物力进行研究, 例如:

- 波浪的高阶效应;
- 柔性结构的水动力行为;
- 流固耦合效应;
- 风、浪、流的谱模式及其耦合效应;
- 地基、结构与流体载荷的耦合效应;
- 粘性阻尼;
- 突发性冲击载荷的产生机理及其对

TL P 的影响;

- 深水环流对 TL P 的影响;
- 海洋内波对 TL P 的影响等。

表 1 TL P 部件设计对流体载荷的依赖程度

部 件		线性 外载	低频 外载	高频 外载	海流 外载
张力腿	最大张力	高	低	高	低
	最小张力	高	低	高	低
	弯曲	高	低	高	中
	疲劳	高	低	高	中
弯曲部件	水平偏移	高	高	低	中
	最大张力	高	高	低	中
地基	链绳拉力	高	低	高	低
	水平剪力	高	高	低	低
	液化	高	低	高	低
	结构	高	低	高	中
	淘蚀	低	高	高	中
气隙	定位 波涌	中 高	高 中	低 低	中 中
外形	最大应力 疲劳	高 高	低 低	高 高	低 低
人员舒适感	工作 休息	高 中	低 中	高 高	低 低
生产过程	油/气分离	高	低	高	低
安装过程	拖运	高	低	低	中
	定位 操作	低 高	高 高	低 低	中 中
甲板	最大应力 疲劳	高 高	低 低	高 高	低 低
机械装备	舱体摇动	高	低	高	低
	地基惯性力	高	低	高	低

另外, 深海环境风、浪、流、环流、内波的卫

星监测及其预报和后报模式, 平台泄油的湍流扩散及其对海洋环境的污染等也是流体力学研究的重要课题。

参考文献

- 1 Nativig B J, Teigen P. Review of Hydrodynamic Challenge in TLP Design. Int J. Offs Polar Eng , 1993, 3 (4)
- 2 Chiu H. Offshore Production System for Ultra-Deep water in the Gulf of Mexico-Part I Well Systems. Int J. Offs Polar Eng , 1992, 2 (4)
- 3 Cooper C, Forristall G Z, Joyce T M. Velocity and Hydrographic Structure of Two Gulf of Mexico Warm-Core Rings. J. Geophys Res 95 Nov2, 1990
- 4 Koch S P, Barker J W, Vennersch J A. The Gulf of Mexico Loop Current and Deep Water Drilling. J. Petroleum Tech , 1991
- 5 Korsmeyer F T, Lee C-H, Newman J N, Slavounos P D. The Analysis of Wave effect on Tension Leg Platforms. Proc Offs Mech and Arctic Eng Conf , Houston, 1988
- 6 McDonld R D. The Design and Field Testing of the Triton Tension - Leg Fixed Platform and Its Future Applications for Petroleum Production and Processing in Deep Water, Proc Offs Tech Conf , Houston, 1974
- 7 Brekke J N, Gardner T N. A nalysis of Brief Loss of Tension in TLP Tethers. Proc Offs Mech and Arctic Eng Symp. , Tokyo, 1986
- 8 A non New Platform begins Offshore Test Oil & Gas J. May 1975
- 9 Breit S R, Newman J N, Slavounos P D. A New Generation of Panel Programs for Radiation-Diffraction Problems. Proc BOSS, 1985
- 10 Nwoga O G, Irani M B. Numerical Prediction of Higher Order Wave Induced Loads on Tethered Platforms . Proc 1st European Offshore Mech Symp. ISOPE, Trondheim, 1990
- 11 Rainey R C T. The Dynamics of Tethered Platforms R NA, London, 1997