

海洋平台振动试验模型的设计¹

李春明

中国石油大学（华东）机电工程学院，山东东营（257061）

E-mail: lichming@126.com

摘 要：综述了海洋平台的类型和特点。总结了海洋平台振动控制的研究。设计了用于海洋平台振动主动控制试验的两个模型，一个用于研究水平面两个方向的振动，另一个用于研究纵向振动。海洋平台模型采用柔性较强的材料，支架模型采用刚性较强的槽钢。对于第一个模型进行了必要的强度计算。设计的模型可用于海洋平台的概念性振动主动控制试验。

关键词：海洋平台，振动主动控制，振动试验模型，石油，机械设计

中图分类号：TU311.3, P752.

1. 引言

海洋平台是海洋石油天然气资源开发的基础性设施。由于一些历史遗留问题，我国和一些邻国的疆土及海域分界线的分歧一直较大，特别是在南海及东海发现大量油气储量后，这一问题就更加突出。海洋平台技术是否过关是关系到海上油气资源利用的大问题。

海洋平台设置在无遮掩的海域里，需要经受住暴风、巨浪、坚冰、地震等恶劣海洋环境条件的考验，因此结构强度问题是首先需要考虑的。随着研究的深入和设计标准的提高，振动控制问题越来越受到重视。结构受到外界激励，会产生振动及噪声。有害的振动和噪声会影响台上人员的健康，使设备仪器不能正常使用及降低结构的使用性能，严重的甚至会导致结构的损坏。因此，结构的减振降噪一直是工程界十分关注的课题。海洋平台结构复杂、体积庞大、造价昂贵，作为海上石油开采的主体结构，集中了各种先进的设计与制造技术，如果由于振动问题发生平台事故将造成严重的经济损失，所以对海洋平台进行振动控制研究在经济上也是非常有必要的。

由于海洋平台的振动具有低频、高幅的特点，且常常受到随机因素的影响，只靠传统的结构加强措施来抵御外部环境载荷以满足结构的可靠性是很不经济的。因此振动的被动控制存在一定的局限性，而振动主动控制是较好的选择。振动主动控制是有源控制，须进行充分的试验之后才可用于现场，本文设计了海洋平台振动主动控制的试验模型。

2. 海洋平台的类型及特点

海洋平台一般都高出海面，能够避免波浪的冲击。型式有三边形、四边形或多边形。上下两层甲板或单层甲板面供安装、储存钻井或采油设备用^[1]。按运动与否，海洋平台可以分为固定式和移动式两大类（见图 1）^[2]。按功能的不同，海洋平台可以分为钻井平台、生产平台、生活平台、储油平台、近海平台等。

2.1 钻井平台的特点

海上钻井的设备相当复杂，包括井架(又称钻塔)、提升设备、转动系统、泥浆循环系统、动力系统、井口系统、封井系统、水下钻井设备的控制操作系统、运动补偿系统等。每种形式均有各自的优点。

2.1.1 坐底式钻井平台

早期在浅水区域作业的一种移动式钻井平台。平台分本体与下体，由若干立柱连接平台

¹本课题得到中国石油天然气集团石油科技青年创新基金（项目编号：05E7029）的资助。

本体与下体。钻井前在下体中灌入压载水使之沉底，下体在坐底时支承平台的全部重量，而此时平台本体仍需高出水面，不受波浪冲击。在移动时，将下体排水上浮，提供平台所需的全部浮力。具有自航能力的平台，其动力装置都安装在下体中。因其工作水深不能调节，已日趋淘汰。

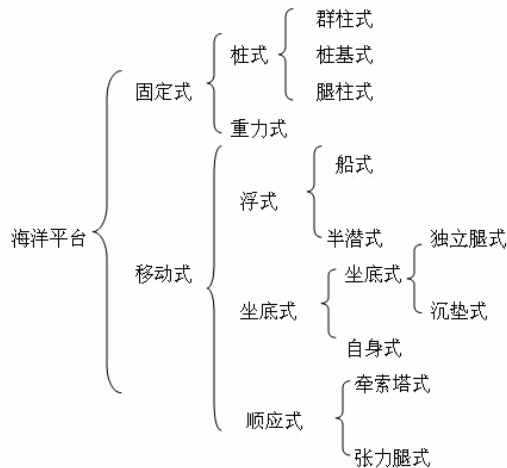


图 1 按运动方式的海洋平台分类
Fig. 1 Classify of ocean platform

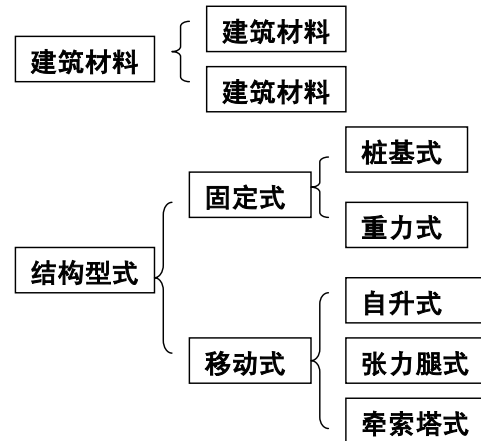


图 2 生产平台分类
Fig. 2 Classify of producing ocean platform

2.1.2 自升式钻井平台

由一个上层平台和多个能够升降的桩腿组成。既要满足拖航移位时的浮性、稳性方面的要求，又要满足作业时着底稳性和强度的要求，以及升降平台和升降桩腿的要求。可适用于不同海底土壤条件和较大的水深范围，移位灵活方便，便于建造。在海上移动式钻井平台中多为该类平台。

2.1.3 半潜式钻井平台

由坐底式钻井平台演变而来，又称为立柱稳定式钻井平台，由平台本体、立柱和下体或浮箱组成。其大部分浮体沉没于水中。在下体间、立柱间、立柱与平台本体间有支撑与斜撑连接，下体间的连接支撑一般设在上方，当平台移位时，可使其位于水线之上，以减小阻力。平台本体高出水面一定高度，以免波浪的冲击。下体或浮箱提供主要浮力，沉没于水下以减小波浪的扰动力。平台本体与下体之间连接的立柱，具有小水线面的剖面，主柱与主柱之间相隔适当距离，以保证平台的稳性。

2.1.4 钻井船

设有钻井设备，能在水面上钻井和移位的船。较早的钻井船是用驳船、矿砂船、油船、供应船等改装的，现在已有专为钻井设计的专用船。目前，已有半潜、坐底、自升、双体、多体等类型。在钻井装置中钻井船的机动性最好，多数具有自航能力，但其钻井性能却较差。井架一般都设在船的中部，以减小船体摇荡对钻井工作的影响。钻井船在波浪中的垂荡幅度比半潜式平台的大，有时要被迫停钻移位，增加停工时间，所以更需采用垂荡补偿器来降低垂荡运动的影响。钻井船适于深水作业，需要适当的动力定位设施。适于波高小、风速低的海区。可对 600m 水深的海底进行探查，掌握海底油、气层的位置、特性、规模、贮量，提供生产能力等。

2.2 生产平台的特点

生产平台通常称为浮游平台，是专门从事海上油、气等的生产性开采、处理、贮藏、监控、测量等作业的平台。可单平台作业，也可多个不同用途的平台由引桥相连，组成石油生产基地。其分类见图 2。

2.2.1 重力式采油平台

一般都是钢筋混凝土结构，是采油、贮存和处理油设备的大型多用途平台。由底部的大贮油罐、单根或多根立柱、平台甲板和组装模块等部分组成。大规模平台可开采几十口井，贮油十几万吨油。平台的总重量可高达数十万吨。

2.2.2 导管架式（桩基式）平台

桩基式平台用钢桩固定于海底。钢桩穿过导管打入海底，并由若干根导管组合成导管架。导管架先在陆地预制好后，拖运到海上安装就位，然后顺着导管一节节地打桩，最后在桩与导管之间的环形空隙里灌入水泥浆，使桩与导管连成一体固定于海底。这种施工方式，使陆上工作量减少。平台设于导管架的顶部，高于作业区的波高，具体高度须视海况而定，一般大约高出 4-5m，可保证不受波浪的冲击。桩基式平台的整体结构刚性强，适用于各种土质，是目前最主要的固定式平台。但其尺度、重量随水深增加而急骤增加，所以在深水中的经济性较差。

2.2.3 张力腿式平台

利用绷紧状态下的锚索链产生的拉力与平台的剩余浮力相平衡的钻井平台或生产平台。半潜式平台的锚泊定位系统，一般是利用锚索的悬垂曲线位能变化平衡平台在波浪中动能变化的。悬垂曲线链的特征之一是链的下端必须与水底相切，以保证锚柄在水底不被拉起，从而使锚保持足够的抓力。张力腿式平台也采用锚泊定位，但其锚索绷紧成直线，而不是悬垂成曲线，钢索的下端与水底几乎是垂直的。锚为桩锚（即打入水底的桩作为锚用），或重力式锚（重块）等，不是容易起出的转爪锚。平台的重力与波浪产生的力之和小于浮力，锚索的拉力绷紧平台使其平稳。

2.2.4 牵索塔式平台

该平台为一瘦长的桁架结构，其下端依靠重力基座坐落于海底或依靠支柱支撑，其上端支承作业甲板。桁架的四周用钢索、重块、锚链和锚所组成的锚泊系统牵紧，从而保持直立状态。小风浪时仅发生微幅摆动；风浪大时，桁架结构摆动幅度大，可把重块拉离海底，从而吸收掉风浪的一部分能量，使平台的摆动仍维持在许可范围内。由于其结构简单、构件尺寸小的特点，受到的风、浪、流的作用力小。能适用于 300~600m 水深的海域。对于水深超过 600 米的海域，由于要保证桁架的抗弯能力，须耗用较多材料，其经济性不好。

3. 基海洋平台振动控制综述

振动控制的方法很多，大致分为被动控制、主动控制、混合控制及半主动控制。主动控制是依靠外界能量提供控制作用来抑制结构响应；被动控制指无外加能源的控制，如消振、隔振、吸振、阻振、结构结构修改^[3]；混合控制是将主动控制和被动控制结合起来以达到有效地控制结构响应的目的；半主动控制是依靠外界能量来改变控制系统的特性、参数以减小结构的响应。

海洋平台的振动控制是广大海洋工程工作者重点研究的热门课题。在平台激励研究方

面,多是研究平台外部载荷,如地震、波浪、风和海冰^[4]等,而忽略了平台内部振源的研究。我国海洋工程界近期在振动被动控制方面应当重点进行以下几方面的研究^[5]。

(1)研究结构修改。对平台内部振源进行系统综合的研究,找出每个振源对平台的影响及其耦合作用。在计算机模拟振源及其影响的基础上,修改平台的结构;降低单个振源对平台的影响,或破坏多振源的耦合作用,以减少局部平台振动过大现象的发生,避免平台局部疲劳破坏。

(2)研制新型抗振平台结构。该类平台可由巨型腿柱和巨型梁组成,是一种超常规的具有巨大抗侧力刚度及整体工作性能的大型结构。它集成了导管架平台和柔性平台的优点而克服了二者的缺点,具有比较好的竖向载荷和水平载荷承载能力,可以有效抑制地震、风和海浪等载荷引起的振动。

(3)研究阻振及半主动阻振。研制可用于整个平台或平台上装置、设备振动能量消耗的阻尼器。调节该阻尼器的参数,使其在正常工作情况下,消耗平台上工作装置或设备的振动能量,减少激励对平台的影响;在地震、台风和海啸等异常情况下,可以利用平台内部的设备和装置做 TMD 或 TLD,实现平台整体振动能量的消耗,减小整个平台的振动响应,使之不受破坏。该类阻尼器还可以利用振源信号进行反馈控制,提高其适应能力和耗能能力。

在振动主动控制方面,多为半主动控制形式的研究。应重点进行以下几方面的研究:

1. 大功率作动器的研究。液压驱动和电驱动都能产生较大的作动力,均在海洋平台的振动主动控制中具有较高的研究价值。液压驱动产生的作动力最大,但需要一套液压装置的支持,在海洋平台上使用会受到空间的制约。电驱动也能产生很大的作动力,现在高性能电设备的出现为电驱动作动器在海洋平台振动主动控制中的应用提供了保障。但电驱动的作动力与电控制量会有滞后现象,会给控制算法的实现带来障碍。研制适合于海洋平台振动主动控制的大功率作动器是振动主动控制理论应用于海洋平台的第一步。

2. 控制律设计。台载机械、海风、海浪、海底地震、海冰、储油罐等引起的动态载荷大都是无法或不易直接测量的不确定载荷而且同时作用于平台结构,无法测量某一种外载荷的响应。另外,海洋平台一旦投入使用,特别是在生产过程当中,想对其施加某一个确定性的激励,以便测量其响应也是不可能的,也就难以用试验的方法研究其振动特性。在工程实际中只能测到海洋平台在诸多动态载荷共同作用下的响应。控制律的设计是基于仅在控制量和控制量与诸多动态外载荷共同作用下的混合响应已知的条件下进行的。这属于较高难度的振动主动控制控制律设计。

3. 海洋平台试验模型试验室的建造。目前海洋平台振动控制研究主要是通过计算机仿真进行,用于现场试验的主要是动态载荷的反演。应建立海洋平台模型试验室,建造海洋平台模型,其振动特性不必与真实海洋平台完全相同。模拟台载机械、海风、海浪、海底地震等对模型的激励,从而进行振动主动控制试验。

4. 海洋平台振动控制试验模型设计

进行振动主动控制试验,须首先设计相应的平台振动控制试验模型。理论上试验模型应该按照真实的海洋平台设计,所有的零件尺寸和比例都严格根据真实的海洋平台确定(见图3)。但由于海洋平台在海上的一些参数无法确定,制作的平台模型与真实模型即使外形相近,其振动特性也未必有可比性。因此设计了振动特性类似于海洋平台、可进行多个方向振动试验的试验模型。

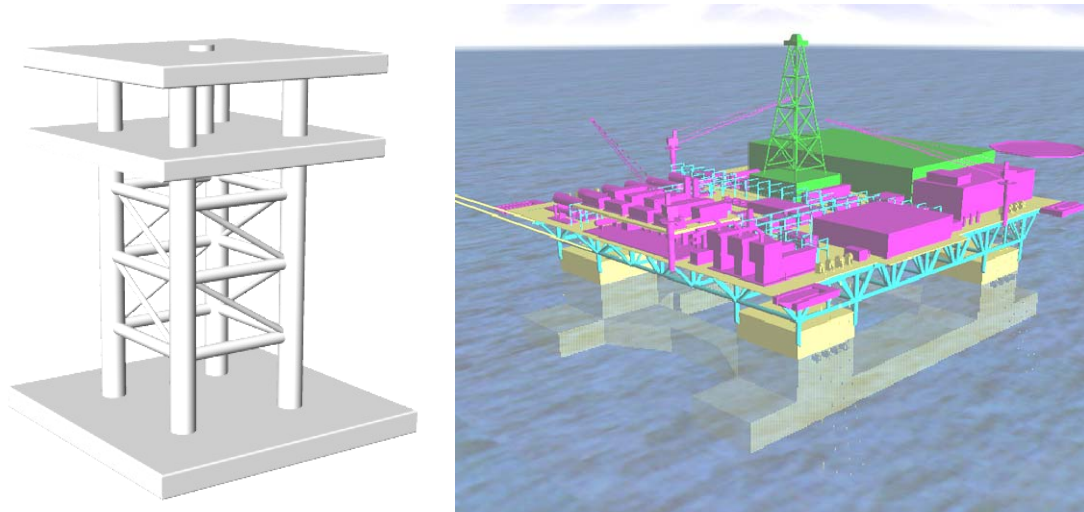


图3 形似海洋平台模型
Fig. 3 model being similar in shape of ocean platform

4.1 试验模型一

根据海洋平台具有较大平面的特点,设计了可进行板的振动及大位移振动研究的海洋平台振动试验模型,该模型主要由一个平板构成。整体效果见图4,模型由一个平板模型、两个底板模型、两根弹簧构成。和平台模型相连接的是由槽钢构成的十字架,通过螺栓和底座平板相连接。十字架用来固定激振器和作动器。模型采用柔性较强的材料,以增强振动的效果,支架采用刚性较强的槽钢,以减小由于激振器和外动器的整体运动带来的外部干扰。

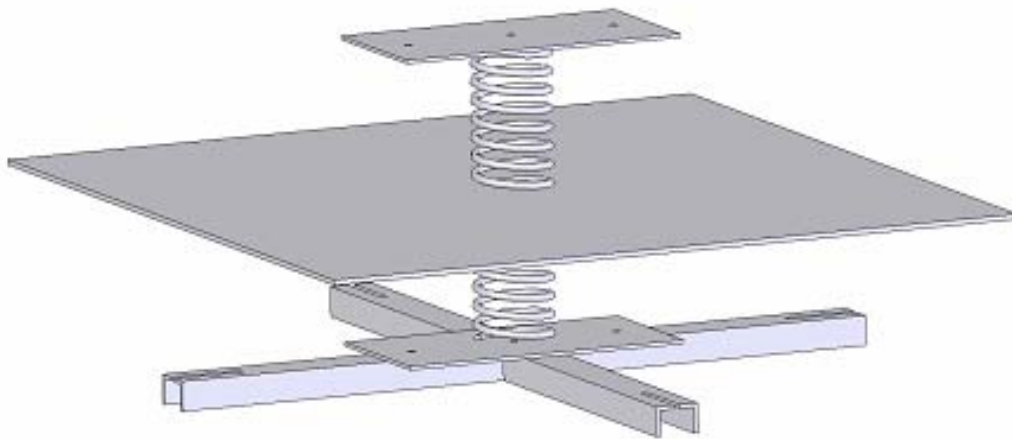


图4 海洋平台试验模型一
Fig.4 model one

4.2 试验模型二

由于海洋平台多具有双层甲板,设计了由两个平板模型的海洋平台试验模型。用一根圆杆作为立柱替代海洋平台的柱脚,模拟其柔性。用一些钢片和小钢条焊接而成的四角架替代海洋平台的甲板,可进行水平面上两个方向的振动试验。设计了与之配套使用的支架,用于安装激振器和作动器。整体模型见图5。

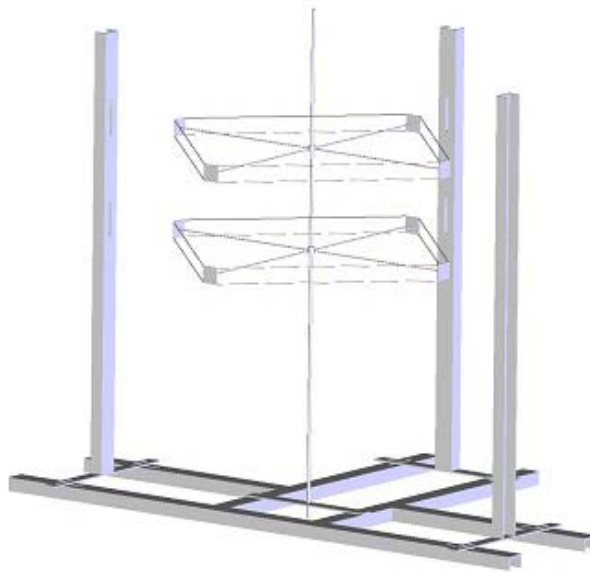


图 5 海洋平台试验模型二
Fig.5 model two

试验模型应满足一度的刚度要求。保证试验模型装配完毕后，翻倒时不发生折断和较大的变形，须进行立柱的强度校核。对其进行了受力分析（见图 6）和强度校核，证明了设计的海洋平台试验模型满足强度要求。

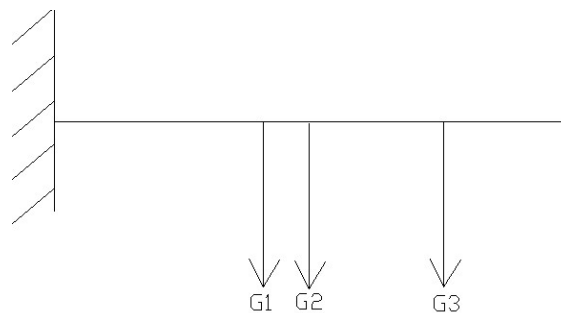


图 6 立柱的受力图
Fig.6 force analysis of pole

5. 结束语

海洋平台半主动控制的振动控制频率仍有局限^[6]，有必要进行海洋平台的振动主动控制研究。目前振动主动控制理论和技术已逐渐从试验室走向现场。虽然海洋平台的振动主动控制的理论研究和试验室研究势在必行，但是由于大功率作动器的限制，而使振动主动控制技术在海洋平台上的推广应用受到了限制。由于振动问题造成的台上人员健康问题十分突出，建议对台上人员进行心理培训。根据潜意识理论，晕车、晕船，以及环境对人体心理健康的影响可通过对潜意识的影响而消减，从而最大限度地减小振动问题的危害。有关“催眠术”的书籍有相关的介绍，可作为参考。

参考文献

- [1] 赵东, 王威强, 马汝建, 蔡东梅. 海洋平台振动控制研究现状及近期发展. 石油机械, 2005, 33(5):69-72
- [2] <http://www.stats-sd.gov.cn/qyzx/qyfc/q275.htm> 李红明. 海洋工程, 2003-09-03/2006-05-25
- [3] 顾仲权, 马扣根, 陈卫东. 振动主动控制. 国防工业出版社, 1997.7
- [4] 陈荣, 王德禹. 正压冲固基础海洋平台冰激振动动力响应. 石油机械, 2006, 34(3):20-23
- [5] 李华英, 李贵荣. 振动控制的发展及趋势. 云南农业大学学报, 2001, 16(1):77-81
- [6] 赵东, 马汝建, 王威强, 蔡冬梅. ETMD 减振系统及其在海洋平台振动控制中的应用. 西安石油大学学报, 2006, 21(2):57-61

The Design of Vibration Experiment Model for the Ocean Platform

Li Chunming

Department of Machine Design, School of Mechatronic Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying (257061)

Abstract

The characteristic and style of ocean platform is summarized. The study on vibration control of ocean platform is sum up. Two experimental models for active vibration control are designed. One is for the test of vibration at horizon. The other is for the portrait vibration. The part for ocean platform is made of flexible material. The bracket is made of rigidity material. The necessary intension computation of the first model is done. The designed model can be used to the experiment of active vibration control for ocean platform.

Keywords: ocean platform, active vibration control, vibration examination model, petroleum, machine design

作者简介: 李春明, 男, 1971 年 10 月生于山东省夏津县, 博士后, 副教授, 研究方向: 机械动力学与振动、机械优化设计、工业设计、心理学等。