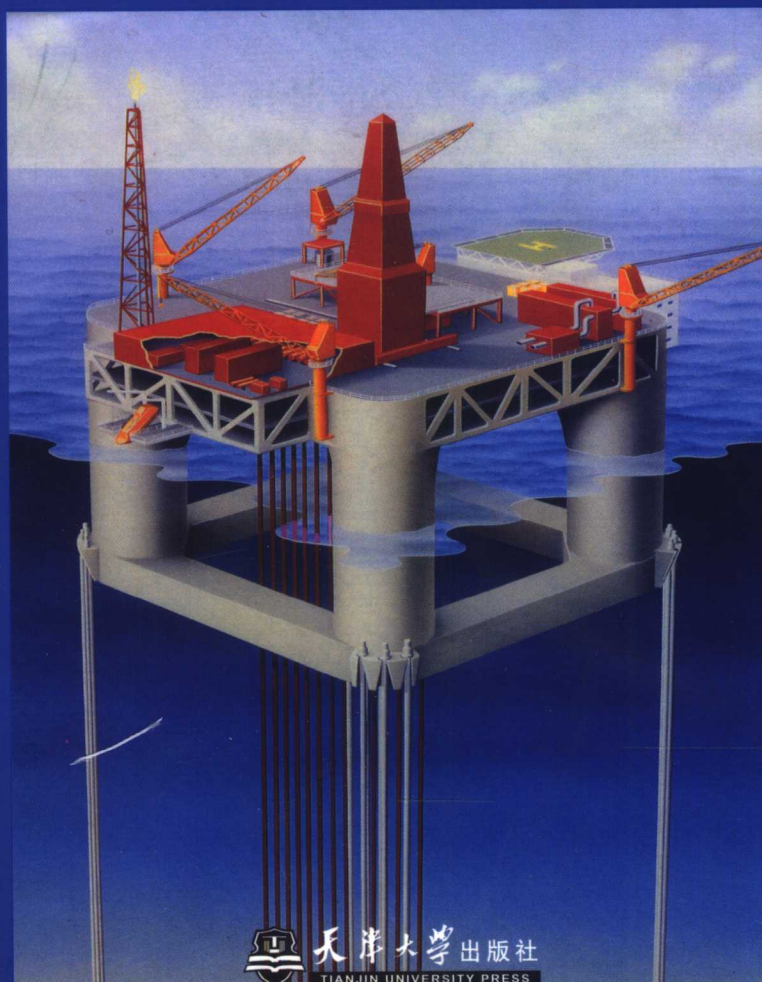


● 董艳秋 著

# 深海采油平台 波浪载荷及响应

WAVE LOADS AND RESPONSE OF THE OIL-EXTRACTION PLATFORM IN DEEP OCEAN



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

# 深海采油平台波浪 载荷及响应

WAVE LOADS AND RESPONSE OF  
THE OIL-EXTRACTION PLATFORM  
IN DEEP OCEAN

董艳秋 著



## 内容提要

本书系统地介绍了世界上已建和在建的深海顺应式平台,即张力腿平台和 Spar 平台,分析它们的结构特点,设计、研究、建造及使用情况。重点论述关系平台生存的深海海洋环境和波浪载荷有关问题。书中给出某些海域可能发生的危及平台安全的畸形波(freak wave)的定义、机理、危害及模拟方法。提供了平台本体波浪载荷和水动力系数计算方法及实例。针对当前世界上关注的深海采油平台深层次问题,从随机、非线性理论出发,讨论了双色波非线性波浪力的计算问题、波流联合作用下张力腿涡激非线性振动及稳定性分析和张力腿平台运动响应等。

本书内容新颖,概念清楚,以实例分析贯穿始终,可供船舶和海洋工程专业、港口及近海工程专业的高年级大学生和研究生学习之用,亦可供从事石油工程、军事工程等相关专业的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

深海采油平台波浪载荷及响应/董艳秋著. —天津:  
天津大学出版社, 2005. 12  
ISBN 7-5618-2219-7

I. 深... II. 董... III. 海上平台: 采油平台 - 波浪载荷 - 研究 IV. TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 134608 号

出版发行 天津大学出版社  
出 版 人 杨欢  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
网 址 www.tjup.com  
短信网址 发送“天大”至 916088  
印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 170mm × 240mm  
印 张 24.5  
字 数 620 千  
版 次 2005 年 12 月第 1 版  
印 次 2005 年 12 月第 1 次  
印 数 1 - 1 500  
定 价 45.00 元



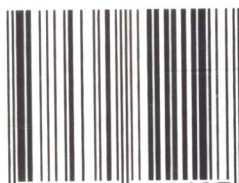
**董艳秋** 1937年11月出生于山西省清徐县。天津大学教授，博士生导师，享受政府特殊津贴。1962年毕业于天津大学水工建筑专业。1960—1963年在北京大学数学力学系进修。1971年负责组建天津大学船舶工程专业，之后长期从事结构动力学及波浪作用下海洋结构物的响应方面的教学科研。主持完成多项国家、部委的重大项目。其中“海上顶推船组连接装置在波浪作用下的受力研究”、“船舶水弹性统一理论开发和应用研究”、“3.5万吨秦申线浅吃水肥大大型运煤船波浪载荷和船底砰击严重性预报”及“舰船运动中的内共振问题研究”等均获“填补国内空白，达到国际先进水平”的部级鉴定和奖励。

1988—1990年在美国Texas A&M大学合作研究，完成美科学基金项目“张力腿平台张力腿在波流共同作用下的非线性涡激振动响应和稳定性研究”。回国后得到国家自然科学基金和博士点基金资助，一直从事深海采油平台方面的研究，有关论文被EI和SCI收录，在国内外有一定影响。共发表论文60余篇，著《船舶波浪外荷和水弹性》。

曾任第14届国际船舶和海洋工程结构委员会（简称ISSC）委员、中国海洋学会离岸工程委员会委员、中国造船学会力学委员会委员等。

组稿编辑 张质文  
责任编辑 张质文  
装帧设计 谷英卉  
技术设计 刘 浩

ISBN 7-5618-2219-7



9 787561 822197 >

定价:45.00元

# 序

海洋覆盖着地球 3/4 的面积,深海底蕴藏着丰富的油气资源,它已成为 21 世纪人类最重要的能源基础之一。世界海洋石油发展的总趋势是走向深水,目前深水大型油气田达 50 多个,包括 200 多座深水平台设施、1 000 多套水下装置、1.2 万 km 的深海管道等设施,深水油田产能已达 350 万桶/d。深水技术的发展不断刷新世界深海作业的最新水平:钻井作业水深达 3 050 m,海底管道铺设水深达 2 150 m,已投产油田作业水深达 2 192 m。深水油气田的开发正在成为世界石油工业的主要增长点和世界科技创新的热点。我国的南海有着丰富的油气资源,被称为世界四大油气聚集地之一,石油地质储量约占我国油气资源总量的 1/3,其中 70% 蕴藏于深水。它是我国海洋石油可持续发展的最有前景的区域。随着我国对南海北部大陆架地球物理勘探的进行,南海深水区块的国际招标以中、菲、越三方在南海争议区 14.5 万 km<sup>2</sup> 区域联合勘探协议的签署,深水油田开发的步伐将会大大加快。我国海洋石油目前的开发水平仅仅在 200m 水深范围,相对于开发深水油田的要求有着较大的差距,这就是我们面临的巨大挑战。

《深海采油平台波浪载荷及响应》今天与读者见面了。这本书主要介绍了 TLP、Spar 深水平台、浮式生产系统等设计建造方面的情况以及深海环境载荷计算分析中的热点问题。它也是董艳秋教授等多年来对世界深水平台技术调查研究的一项成果,相信这本书的出版对我国海洋石油向深水进军将发挥积极的作用。

曹恒一

2005 年 6 月

# 前言

自 1920 年委内瑞拉在马开波湖上用木结构平台钻井以来,海上石油资源的开发至今已有 80 多年的历史。1947 年在美国墨西哥湾建成世界第一座钢结构平台,50 多年来海上油气的开发和利用越来越受到世界各国重视。20 世纪 60 年代,以美国为首的许多西方国家为摆脱能源危机,纷纷投资开发近海石油。70 年代形成近海石油的开发高潮。当时,30 多个国家的近海石油产量达 3.76 亿 t。80 年代,全世界从事海上油气勘探开发的国家和地区超过 100 个,其中 40 多个国家海上石油年产量达 6.8 亿 t,占陆海石油总产量 32 亿 t 的 21%。2004 年海上石油产量约 13.15 亿 t,占世界石油总产量的 34%。

据统计,地球表面积约为 5.11 亿  $\text{km}^2$ ,海洋占 70.9%,约占人类生活空间的 2/3。海洋平均深度为 3 730 m,深度为 3 000 ~ 6 000 m 的海域约占海洋总面积的 73.8%;水深小于 200 m 的大陆架仅占海洋总面积的 7.49%。由此可见,人类从深海开发油气是今后长时期发展的必然趋势。

随着海上油气开发逐渐向深海推进,传统的移动平台(如钻井船、半潜式平台)由于在海浪作用下,其运动性能难以满足深水作业的要求而受到挑战。固定式导管架平台和重力式平台随水深增加其自重和工程造价大幅度上升,因此亦不能适应深海油气开发的需要。人类从 20 世纪 50 年代开始探索深海采油新型平台,顺应式平台(compliant platform)的概念随之被提出。经过许多实验和探索,1984 年在英国北海建造了世界上第一座张力腿平台(简称 TLP)即 Hutton 平台,它位于水深 157 m 处。这标志着深水采油张力腿平台技术完全成熟。事实上,该平台的设计、施工以及建成后实际监测都为以后的张力腿平台的建造提供了丰富的资料。

20 世纪以来世界上已建成传统形式的张力腿平台 11 座,水深从三百米到一千多米,除一座为混凝土材料外,均为钢结构。其基础形式不仅保留桩基而且还采用了裙式重力基础。90 年代以来,张力腿平台的形式有了很大的改进。现在已形成三大系列,即 SeaStars 系列、MOSES 系列和 ETLP 系列。所谓 SeaStars TLP 指的是 1992 年由 Atlantia 公司提出的单柱式简易小型平台设计方案,在墨西哥湾已建成 4 座;MOSES 是 Minimum Offshore Surface Equipment Structure 的简称,这种 Mini-TLP 的概念是由美国海洋工程师协会主席 Peter Wybro 博士提出的。其主体受波浪力的作用小,改善了平台的运动特性,可在 300 m 到 1 800 m 处工作。这种类型平台在墨西哥湾已建成 2 座。ETLP 是延伸式张力腿平台(Extended Tension Leg Platform)的缩写,目前在西非安哥拉 Kizomaba 油田建设这样的平台 2 座。至今为止,世界上已建和正建的张力腿平台共 21 座,其中在北海有 3 座、墨西哥湾有 14 座、东南亚有 2 座、西非有 2

座。

与此同时,另一种深水采油平台 Spar 平台亦于 1987 年由 Edward E. Horton 设计。它具有钻探、钻井、完井和采油、储油多种功能,亦可设计成井口平台与浮式生产储油装置(FPSO)配合使用。1997 年世界上第一座 Spar 平台 Neptune 建成投产,短短几年中,它的结构产生了一些变化。人们将 2001 年提出的桁架式结构形式的平台称为第二代 Spar 平台或称为 Truss Spar 平台。最近,又出现主体采用蜂巢结构形式的平台,称为第三代 Spar 平台或称为 Cell Spar 平台。目前这种类型平台世界上已建和在建的共 13 座。Spar 平台是继张力腿平台之后的第二主力深水采油平台,已经受到人们的普遍青睐。值得提出的是,在深海油气开发过程中,各种浮式生产储油装置(FPSO)亦在发挥着重要作用。它与井口平台一起完成海上石油生产任务。

我国海底油气资源丰富,主要集中在渤海、黄海、东海以及南海北部。大陆架勘探预计石油资源为 275.3 亿 t,天然气资源为 10.6 亿  $\text{m}^3$ 。目前发现率仅为 18.5% 和 9.2%,尚具有很大潜力。

2003 年,中国海洋石油总公司国内外油气总产量达 3 336 万 t 油当量,其中国内产量 2 601 万 t,海外权益产量 735.4 万 t。根据有关部门发布的数据表明,2003 年海洋石油产量 2 090 万 t,比上年增长 4.2%,占全国石油总产量的 13%。2004 年海洋石油产量增长至 4 000 万 t。

随着我国国民经济的快速增长,能源需求量越来越大。因此,我国在加快近海油气开发的同时,向深海采油发展已势在必行。

作者于 1988 年至 1990 年在美国 Texas A & M 大学与 Jack, Y. K. Lou 教授合作,研究张力腿平台涡激非线性振动问题。1990 年回国后,得到国家自然科学基金、国家教委博士点基金的资助,指导我的研究生们继续从事这方面的研究,发表相关的论文近 30 篇。为适应我国深海油气开发的需要,特将有关研究成果总结写成此书,以供读者参考。

全书包括 4 部分内容,共 10 章。前面 3 章分别对目前世界深海采油的主力军——张力腿平台(TLP)、Spar 平台和浮式生产储油装置(FPSO)作了系统的、较全面的介绍,讲述其发展过程、主要特点、结构形式、设计建造、经济效益以及实施结果等。对 2004 年前全世界所有的 21 座 TLP 和 13 座 Spar 平台作了详细分析。对于浮式生产储油装置重点介绍其转塔和系泊设备以及我国浮式生产储油装置产业的发展。第 4 章和第 10 章是关于海洋环境有关问题的描述。深海风大浪高、复杂多变,除一般的海浪、海流外,某些海域的畸形波(freak wave)对平台的威胁需特别关注。第 5 章、第 6 章、第 7 章是有关平台波浪载荷的研究。首先针对上述深海采油平台本体的特点,给出浮式直立圆柱和柱群在规则波作用下波浪载荷的计算方法和实例的无因次计算结果。同时,由直立浮动圆柱和柱群的辐射问题求解,得到其无因次附加质量和附加阻尼系数,可供工程设计参考使用。其次是考虑顺应式深海采油平台低频慢漂

等深层次问题,特别在第7章研究了随机海浪中双色波产生的差频(低频)及和频(高频)两种不同波可能给平台带来的潜在威胁,给出两种非线性二阶波浪力的计算方法和实例计算结果。第8章、第9章是响应问题。在第8章中,给出了在波流共同作用下张力腿涡激非线性振动方程组及具有创新性的求解方法。同时,对关系张力腿平台安全的非线性稳定性作了较深入的研究。第9章研究张力腿平台的运动响应。采用拟静态分析和动态分析方法分别得到平台偏移、垂直下沉、最大张力及转角诸参量之间的关系。建立纵荡和升沉运动的非线性耦合微分方程组,计算了常见海浪频率范围内的响应,证实了张力腿平台在一般海况下运动响应较小的特点。同时,初步探讨了张力腿平台的低频运动响应,得到一些有益结论。

本书得以出版,要感谢多次让我提供深海采油研究资料的同行们。感谢我的博士生杨春晖、胡志敏、杨冠声及硕士生闫志杰、陈学闯、崔毅、张智、芮光六在校期间所做的有关研究工作。感谢张智、芮光六两位同志不辞劳苦,收集资料、编排、整理、打印等,促成本书问世。感谢天津大学副校长胡小唐教授高瞻远瞩对本书出版给予的大力支持,感谢天津大学建工学院、研究生院和出版社为本书出版所做的工作。衷心感谢中国海洋石油总公司副总工程师、中国工程院院士曾恒一百忙中审查书稿,并作序。

由于作者水平所限,时间仓促,书中难免存在缺点和错误,请读者多提宝贵意见。

董艳秋

2005年6月

## 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 第 1 章 张力腿平台的种类、结构和建造    | ( 1 )  |
| 1.1 综述                  | ( 1 )  |
| 1.1.1 历史回顾              | ( 1 )  |
| 1.1.2 张力腿平台总体结构形式和特点    | ( 4 )  |
| 1.1.3 张力腿平台的分类          | ( 6 )  |
| 1.2 传统类型的张力腿平台          | ( 9 )  |
| 1.2.1 平台实例介绍和分析         | ( 9 )  |
| 1.2.2 第一代张力腿平台汇总        | ( 19 ) |
| 1.3 两种新形式张力腿平台的构想与研究    | ( 20 ) |
| 1.3.1 混合式张力腿平台          | ( 20 ) |
| 1.3.2 悬式张力腿平台           | ( 21 ) |
| 1.4 SeaStars 系列单柱式张力腿平台 | ( 23 ) |
| 1.4.1 SeaStars 的产生      | ( 23 ) |
| 1.4.2 总体结构设计            | ( 24 ) |
| 1.4.3 特殊优势              | ( 26 ) |
| 1.4.4 平台实例              | ( 30 ) |
| 1.4.5 SeaStar TLP 平台汇总  | ( 35 ) |
| 1.5 MOSES 系列张力腿平台       | ( 36 ) |
| 1.5.1 简介                | ( 36 ) |
| 1.5.2 总体结构及特点           | ( 37 ) |
| 1.5.3 平台实例              | ( 40 ) |
| 1.6 延伸式张力腿平台            | ( 43 ) |
| 1.6.1 ETLP 简介           | ( 43 ) |
| 1.6.2 总体结构              | ( 44 ) |
| 1.6.3 ETLP 的特点          | ( 46 ) |
| 1.6.4 平台实例              | ( 51 ) |
| 1.7 总结及展望               | ( 56 ) |
| 1.7.1 张力腿平台在不断发展        | ( 56 ) |
| 1.7.2 张力腿平台的发展对产业界的影响   | ( 57 ) |
| 参考文献                    | ( 58 ) |
| 第 2 章 Spar 平台的种类和结构     | ( 61 ) |
| 2.1 Spar 平台的产生及历史回顾     | ( 61 ) |

|                                        |           |
|----------------------------------------|-----------|
| 2.2 Spar 平台总体结构 .....                  | (63)      |
| 2.2.1 平台上体 .....                       | (64)      |
| 2.2.2 平台主体 .....                       | (65)      |
| 2.2.3 中央井及立管系统 .....                   | (67)      |
| 2.2.4 系泊系统 .....                       | (68)      |
| 2.3 Spar 平台的建造与安装 .....                | (70)      |
| 2.3.1 第一阶段 .....                       | (70)      |
| 2.3.2 第二阶段 .....                       | (71)      |
| 2.3.3 第三阶段 .....                       | (71)      |
| 2.3.4 第四阶段 .....                       | (71)      |
| 2.4 Spar 平台的总体性能 .....                 | (75)      |
| 2.4.1 结构模型 .....                       | (75)      |
| 2.4.2 总体运动响应 .....                     | (76)      |
| 2.4.3 模型实验及分析 .....                    | (80)      |
| 2.4.4 平台运动响应对各关键部位的影响 .....            | (83)      |
| 2.5 世界上有关 Spar 平台的研究 .....             | (83)      |
| 2.5.1 早期研究 .....                       | (83)      |
| 2.5.2 近期研究 .....                       | (84)      |
| 2.6 第一代 Spar 平台——Classic Spar 平台 ..... | (88)      |
| 2.6.1 平台实例 .....                       | (89)      |
| 2.6.2 Classic Spar 平台发展状况小结 .....      | (93)      |
| 2.7 第二代 Spar 平台——Truss Spar 平台 .....   | (94)      |
| 2.7.1 Truss Spar 平台总体结构 .....          | (94)      |
| 2.7.2 平台实例 .....                       | (96)      |
| 2.7.3 Truss Spar 平台发展状况小结 .....        | (101)     |
| 2.8 第三代 Spar 平台——Cell Spar 平台 .....    | (102)     |
| 2.8.1 Cell Spar 平台总体结构 .....           | (102)     |
| 2.8.2 平台实例——Red Hawk Spar 平台 .....     | (103)     |
| 2.9 Spar 平台的优势及发展状况 .....              | (105)     |
| 2.9.1 Spar 平台的优势 .....                 | (105)     |
| 2.9.2 Spar 平台目前的发展状况 .....             | (106)     |
| 参考文献 .....                             | (107)     |
| <br>第3章 浮式生产储油装置 .....                 | <br>(111) |
| 3.1 世界海上油气生产方式的变化 .....                | (111)     |
| 3.2 FPSO 的组成及特点 .....                  | (112)     |
| 3.2.1 FPSO 设施的主要组成 .....               | (113)     |

|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| 3.2.2 FPSO 的主要特点 .....                   | (114)        |
| 3.2.3 其他浮式系统 .....                       | (115)        |
| 3.3 FPSO 系泊系统 .....                      | (115)        |
| 3.3.1 系泊设计 .....                         | (115)        |
| 3.3.2 系泊模式 .....                         | (116)        |
| 3.3.3 锚链结构 .....                         | (116)        |
| 3.3.4 锚泊点与锚设备 .....                      | (119)        |
| 3.4 转塔系泊装置 .....                         | (120)        |
| 3.4.1 转塔系泊装置的种类 .....                    | (120)        |
| 3.4.2 转塔的应用 .....                        | (122)        |
| 3.4.3 内部转塔系泊装置的研究动态 .....                | (124)        |
| 3.5 海底生产设备与海面储油装置 .....                  | (126)        |
| 3.5.1 海底生产设备 .....                       | (126)        |
| 3.5.2 海面生产储油装置 .....                     | (127)        |
| 3.5.3 穿梭油轮和装卸系统 .....                    | (128)        |
| 3.6 FPSO 的疲劳分析与安全管理 .....                | (128)        |
| 3.6.1 疲劳分析 .....                         | (129)        |
| 3.6.2 FPSO 油气爆炸分析 .....                  | (132)        |
| 3.6.3 FPSO 安全管理及控制 .....                 | (132)        |
| 3.7 国外 FPSO 的概况及应用实例 .....               | (133)        |
| 3.7.1 国外 FPSO 的概况 .....                  | (133)        |
| 3.7.2 应用实例 .....                         | (135)        |
| 3.8 我国浮式生产储油装置产业的发展 .....                | (139)        |
| 3.8.1 历史回顾 .....                         | (139)        |
| 3.8.2 FPSO 产业的形成 .....                   | (140)        |
| 3.8.3 我国 FPSO 的技术特点和开发应用 .....           | (142)        |
| 3.8.4 我国 FPSO 汇总及应用实例 .....              | (149)        |
| 参考文献 .....                               | (156)        |
| <b>第 4 章 畸形波 .....</b>                   | <b>(158)</b> |
| 4.1 概述 .....                             | (158)        |
| 4.1.1 畸形波的定义 .....                       | (158)        |
| 4.1.2 关于畸形波的记录及造成的危害 .....               | (159)        |
| 4.1.3 畸形波的形态特征及产生机理分析 .....              | (162)        |
| 4.2 畸形波的数值模拟 .....                       | (163)        |
| 4.2.1 非线性控制方程——Schrödinger 方程模拟畸形波 ..... | (163)        |
| 4.2.2 优化理论模拟畸形波 .....                    | (166)        |

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| 4.3 畸形波的实验室模拟 .....                | (173)        |
| 4.3.1 畸形波的实验室模拟方法之一 .....          | (174)        |
| 4.3.2 畸形波的实验室模拟方法之二 .....          | (178)        |
| 4.4 畸形波对海洋结构物设计的影响 .....           | (180)        |
| 4.5 中国海畸形波存在的可能性初步分析 .....         | (182)        |
| 4.5.1 中国海的海底地貌特征与畸形波可能性分析 .....    | (182)        |
| 4.5.2 南海的海流、气候特征与畸形波可能性分析 .....    | (184)        |
| 参考文献 .....                         | (189)        |
| <b>第5章 深海采油平台本体波浪载荷计算 .....</b>    | <b>(192)</b> |
| 5.1 概述 .....                       | (192)        |
| 5.2 波浪载荷计算的理论依据 .....              | (194)        |
| 5.2.1 直立浮式圆柱和柱群绕射问题的数学提法 .....     | (194)        |
| 5.2.2 基本假设和坐标系 .....               | (194)        |
| 5.3 孤立的直立浮式圆柱一阶绕射问题的求解 .....       | (196)        |
| 5.3.1 绕射速度势的求解 .....               | (196)        |
| 5.3.2 孤立的直立浮式圆柱体波浪载荷计算 .....       | (200)        |
| 5.4 直立浮式柱群的绕射问题 .....              | (202)        |
| 5.4.1 直立浮式柱群的绕射速度势的求解 .....        | (202)        |
| 5.4.2 直立浮式柱群线性波浪载荷计算 .....         | (205)        |
| 5.5 平台本体波浪绕射载荷计算和分析 .....          | (207)        |
| 5.5.1 双柱波浪力计算 .....                | (207)        |
| 5.5.2 典型四柱式张力腿平台本体波浪载荷实例计算 .....   | (215)        |
| 5.6 本章小结 .....                     | (222)        |
| 参考文献 .....                         | (223)        |
| <b>第6章 直立浮动圆柱和柱群的水动力系数计算 .....</b> | <b>(225)</b> |
| 6.1 水动力系数计算的理论基础 .....             | (225)        |
| 6.1.1 水动力系数的数学提法 .....             | (225)        |
| 6.1.2 基本假设和坐标系 .....               | (225)        |
| 6.2 孤立直立浮动圆柱辐射问题的求解 .....          | (227)        |
| 6.2.1 流场速度势的求解 .....               | (227)        |
| 6.2.2 孤立浮动圆柱体水动力系数计算 .....         | (231)        |
| 6.3 直立浮动柱群的辐射问题处理 .....            | (235)        |
| 6.3.1 直立浮动柱群的辐射理论 .....            | (235)        |
| 6.3.2 柱群水动力系数计算 .....              | (239)        |
| 6.4 直立浮动圆柱和柱群水动力系数计算和分析 .....      | (241)        |

|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| 6.4.1 单根直立浮动圆柱的水动力系数计算 .....             | (242)        |
| 6.4.2 四柱组合柱群的水动力系数计算分析 .....             | (245)        |
| 6.5 本章小结 .....                           | (247)        |
| 参考文献 .....                               | (247)        |
| <b>第7章 双频入射波作用下二阶绕射问题的研究 .....</b>       | <b>(248)</b> |
| 7.1 问题的由来及研究综述 .....                     | (248)        |
| 7.2 双频入射下的二阶边界条件 .....                   | (250)        |
| 7.3 用边界积分方程法求解二阶差频与和频速度势 .....           | (255)        |
| 7.3.1 建立一阶、二阶速度势的边界积分方程 .....            | (255)        |
| 7.3.2 线性源势函数及其导数的求解 .....                | (259)        |
| 7.3.3 二阶绕射势边界积分方程中自由表面积分项的求解 .....       | (263)        |
| 7.4 二阶差频与和频问题的二次传递函数 .....               | (267)        |
| 7.5 使用非直接法求差频与和频力的半解析解 .....             | (271)        |
| 7.6 计算实例及讨论 .....                        | (273)        |
| 7.6.1 确定 $N_p$ 、 $N$ 和 $b$ 的取值 .....     | (274)        |
| 7.6.2 不同入射频率组合下差频与和频力的计算结果 .....         | (276)        |
| 7.7 本章小结 .....                           | (289)        |
| 参考文献 .....                               | (290)        |
| <b>第8章 波流联合作用下张力腿涡激非线性动力响应和稳定性 .....</b> | <b>(292)</b> |
| 8.1 概述 .....                             | (292)        |
| 8.1.1 涡激非线性动力响应 .....                    | (292)        |
| 8.1.2 张力腿平台涡激非线性振动的稳定性 .....             | (293)        |
| 8.2 深水海洋平台张力腿涡激非线性响应 .....               | (294)        |
| 8.2.1 非线性振动方程 .....                      | (294)        |
| 8.2.2 综合数值解法 .....                       | (296)        |
| 8.2.3 实例计算分析 .....                       | (298)        |
| 8.3 张力腿平台涡激非线性振动稳定性研究 .....              | (304)        |
| 8.3.1 数学方程的简化 .....                      | (304)        |
| 8.3.2 KBM 法近似分析和稳定性判别 .....              | (306)        |
| 8.3.3 实例计算研究 .....                       | (310)        |
| 参考文献 .....                               | (317)        |
| <b>第9章 张力腿平台运动响应研究 .....</b>             | <b>(319)</b> |
| 9.1 概述 .....                             | (319)        |
| 9.2 非线性拟静态分析 .....                       | (319)        |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 9.2.1 基本假设和坐标系统 .....         | (320)        |
| 9.2.2 静态偏移和下沉的数学描述 .....      | (320)        |
| 9.2.3 极限状态下静态偏移和下沉的定性分析 ..... | (322)        |
| 9.3 波浪作用下张力腿平台运动响应分析 .....    | (324)        |
| 9.3.1 基本假设和坐标系统 .....         | (324)        |
| 9.3.2 动力平衡方程 .....            | (325)        |
| 9.3.3 龙格-库塔-吉尔法求解非线性方程 .....  | (327)        |
| 9.4 张力腿平台实例计算和分析 .....        | (328)        |
| 9.4.1 非线性拟静态分析 .....          | (329)        |
| 9.4.2 张力腿平台非线性动态分析 .....      | (333)        |
| 9.4.3 张力腿平台低频运动响应探讨 .....     | (339)        |
| 参考文献 .....                    | (350)        |
| <b>第 10 章 随机海浪和波流场 .....</b>  | <b>(352)</b> |
| 10.1 随机海浪理论简述 .....           | (352)        |
| 10.1.1 海浪要素的统计分布规律 .....      | (352)        |
| 10.1.2 海浪谱 .....              | (358)        |
| 10.2 波流联合作用场中流的等效作用研究 .....   | (365)        |
| 10.2.1 基本假设和坐标系统 .....        | (365)        |
| 10.2.2 等效均匀流基本理论 .....        | (367)        |
| 10.2.3 小尺度直立桩柱波流联合作用力计算 ..... | (373)        |
| 10.7.4 计算实例及分析 .....          | (375)        |
| 参考文献 .....                    | (377)        |

# 第1章 张力腿平台的种类、结构和建造

## 1.1 综述

### 1.1.1 历史回顾

#### 1. 张力腿平台产生的背景

随着全球人口的增加与当今科学技术的发展,人类生存空间逐步向海洋与空中拓展。海洋蕴藏着丰富的可供人类从事生产、生活的资源,包括石油资源、动力资源、矿产资源、化工资源、生物资源等,海洋是人类开发的主要领域。目前,全球对海洋的开发利用已经进入日趋完善和成熟的阶段。根据统计,21世纪将是一个海洋开发利用空前迅猛发展的时期,这种开发也将是全方位的,从现在人类需求来看,海洋开发利用主要集中在以下几方面:

- ①海底石油资源的开发利用;
- ②海底矿物资源的开发利用;
- ③海水及其所含物质资源的开发利用;
- ④海洋作为交通、通信通道的利用;
- ⑤海洋能源(包括波能、潮汐能、温差能等)的开发利用;
- ⑥海洋空间的开发利用。

无论以什么形式对海洋开发利用,都必须以海洋工程设施为桥梁。近20年来,随着全球对能源需求量的不断增加,各国对海洋油气的勘探和生产更加重视,从而涌现出大量新型的开采设备及其科学的结构形式和先进的检测维修方法。

世界上第一座近海石油平台于1947年建在墨西哥 Couissana 海域,平台高出水平面6 m。从此以后,各类海上建筑物陆续出现。海洋工程设施因开发的内容不同其形式也有很大的不同,而对应每一项开发因完成的功能不同其所用的工程设施也有很多不同的形式。仅就石油开发而言,就拥有百余种海上工程设施。目前世界海洋石油平台约有2 000座。海洋石油平台按所用建筑材料可分为钢结构石油平台、混凝土石油平台和钢结构混凝土混合平台,其中大多数海洋石油平台是钢结构形式。钢结构石油平台由钢套管作为油气生产过程中的主要支撑结构。按平台结构形式又大致分为钢套管平台、重力式平台、顺应式平台。海洋工程中选择什么样的平台结构形式主要考虑平台所处的海洋环境,包括风、流、浪等载荷,水深,海底地质条件以及平台的安装和组建方法等。

随着海洋开发愈来愈向深海推进,油气资源的开发也不断进军深海。一

般深海海域中自然环境十分恶劣,环境载荷比较复杂,对海洋工程设施的理论分析、设计安装等的要求就更加严格和精确。21 世纪初,海上油气开发可望达到水深为 2 500 m 以上的所谓极深水海域。据 2000 年的统计,在当时世界上近 2 000 座海洋石油平台中,只有 65 座可以在 750 m 以上深水区作业的半潜式平台和钻井船,其中仅 25 座能有效地工作在 1 000 m 以上的深水区。可以说,随着深海开发形势的发展,适应深海作业的海洋工程建筑面临着非常严峻的挑战。

由于深水作业的不断增多,各种传统的移动式平台(如半潜式平台和钻井船等),其运动性能和定位难以满足深水作业的要求,而各类固定式平台(如重力式平台和导管架平台等),因自重和工程造价随水深变化而大幅度地增加,也已不能适应深海环境,所以必须发展新型的平台。从 20 世纪 50 年代以来,一些国家不断进行这方面的研究探索,并设计出顺应式平台(compliant platform)。在近 20 年,顺应式平台已得到广泛的发展和应用。其显著特点是具有特殊的结构形式,从而使工程造价较低,结构安全性良好。张力腿平台(tension leg platform, 简称为 TLP)就是顺应式平台结构的典型。

## 2. 张力腿平台的问世及发展

1954 年,美国的 R.O. Marsh 率先提出了采用倾斜系泊索群固定的海洋平台方案,被公认为张力腿平台的鼻祖,之后 30 年是张力腿平台的理论研究探索和工程酝酿阶段,各国学者对张力腿平台进行了艰难而又富有成效的研究,并有一批实验平台相继建成。

1962 年,英国石油开发公司在苏格兰附近海域 30 m 水深处建造了一个 124 t 的三角形张力腿平台试验平台“Triton”,并进行了全面理论分析和实验研究。结果表明,该类型平台在波浪中运动性能优异,大大推进了张力腿平台相关研究和发展。

1974 年,美国深海石油技术公司在加利福尼亚附近海域 60 m 水深处安装了一座 650 t 的张力腿试验平台“Deep Oil X-1”,并进行了长达 5 年的试验研究和理论分析对比,在波浪中运动性能、张力腿内张力变化规律和海底锚固基础等方面得出了大量有益结论和数据。同一时期,日本、挪威、荷兰、意大利等国的相关海洋工程科研机构也投入了大量人力、物力进行理论和实验研究,提出了种类繁多的张力腿平台方案。其后,在张力腿平台总体性能、主尺度优化、张力腿内张力变化特性和施工安装等各个具体环节进行了全面深入的研究分析。我国相关科研机构亦密切注视张力腿平台技术的发展。20 世纪 80 年代,中国船舶研究中心进行了将近 10 年的张力腿平台模型实验研究,为发展我国的张力腿平台技术做出了开拓性工作。

1984 年,Conoco 公司在北海 157 m 深的 Hutton 油田安装了世界上第一座张力腿平台,这标志着张力腿平台技术的完全成熟与工程技术化,并正式应用于实际生产领域。此后,在逐步深入的理论实验研究基础上,1989 年建成了