

HAIYANG GONGCHENG
JIEGOU DONGLIXUE

海洋工程 结构动力学

主编 唐友刚
编者 沈国光
刘利琴



海洋工程结构动力学

主编 唐友刚

编者 沈国光 刘利琴



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书结合海洋工程环境及结构特征,介绍海洋工程结构动力分析的理论与方法,包括线性振动、非线性振动、随机振动的基本理论和方法以及风、浪、流等对海洋结构的作用机理、确定性载荷和随机波浪载荷计算理论,同时结合海洋固定平台、铰接塔平台、单点系泊与锚泊系统及浮式结构等,介绍海洋结构波浪作用下动力响应分析的理论与方法。对于深海平台动力分析问题作了简单介绍对海洋工程结构非线性振动响应特点和分析方法进行了深入介绍。

本书特色是紧密结合海洋工程技术发展需要,力求理论联系实际,以大量海洋工程结构实例分析贯穿全书。

本书可作为船舶与海洋工程、港口海岸及近海工程类研究生及高年级本科生教材,也可供水利工程、土木工程、机械工程、力学类专业学生学习之用,还可供相关领域研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程结构动力学/唐友刚主编;沈国光,刘利琴
编. —天津:天津大学出版社,2008.8
ISBN 978-7-5618-2735-2

I. 海… II. ①唐…②沈…③刘… III. 海洋动
力学:结构动力学 IV. P731.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 116716 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
印 刷 昌黎县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 185mm × 260mm
印 张 18.75
字 数 468 千
版 次 2008 年 8 月第 1 版
印 次 2008 年 8 月第 1 次
印 数 1-1 500
定 价 32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

随着海洋开发与海洋空间利用工程的进展,出现了多种形式的海洋结构物。目前,基于海洋工程结构的环境载荷、动力响应特性及动力响应分析方法研究的不断深入,形成了一门崭新的学科——海洋工程结构动力学。该学科为海洋工程结构物的设计开发、建造、安装及运行管理,提供坚实的理论基础与分析方法。

海洋工程结构物的基本用途包括海洋开发和海洋利用。目前,海洋结构物的大部分用于海洋油气的勘探、开发、生产及储运。这些结构物包括固定式平台、移动式钻井平台、海底管道、油气浮式生产系统及近几年发展起来的深海平台等。近几年来,海洋开发和利用工程发展迅猛,新技术和新结构日新月异,其用途、结构形式及工作原理千差万别。本书凝练出海洋工程结构中具有普遍意义的动力学问题,进行深入阐述。

全书共分12章。第1章回顾海洋工程结构的进展并总结海洋结构特征,提出海洋工程所面临的重大理论和技术课题;第2章讨论海洋环境,重点讨论波浪载荷计算方法;第3章结合海洋工程结构,介绍单自由度系统动力学的基本理论与方法;第4章讨论随机振动的基本理论、随机波浪载荷计算、单自由度线性结构随机振动的响应特性等;第5章结合海洋工程中的系泊结构、铰接塔平台、单点系泊系统等,介绍单自由度非线性系统振动分析方法,讨论海洋工程结构的运动突变及异频振动等;第6章结合海洋多点系泊船舶、固定平台及牵索塔平台,讨论多自由度系统的模型建立及动力学理论与方法等;第7章介绍多自由度非线性系统分析方法及动力特性,讨论非线性多自由度系统的内共振、参数激励、组合共振等问题,同时介绍了多自由度系统随机激励振动响应分析方法;第8章介绍动力问题有限单元法以及振动方程求解的若干数值方法等;第9章介绍海流和风致涡激振动的机理、涡激升力及涡激响应分析方法,讨论了非对称截面的超驰振动问题及消除涡激的工程措施;第10章讨论梁式结构和缆索结构建模,固有振动频率及强迫振动响应分析方法,介绍梁的参激动力稳定性及随机波激起的梁式结构振动响应特性等;第11章计算固定平台时域振动及随机振动响应,分析深海平台张力腿波流作用下的非线性参激振动等;第12章介绍浮体在波浪中运动的分析理论,铰接塔平台、单点系泊和锚泊系统的分析方法以及 Spar 平台垂荡-纵摇耦合运动问题。

多年来,本书作者从事结构动力学、波浪理论和载荷、海洋工程结构动力分析的科研和教学工作,承担国家自然科学基金、国家863项目和博士点基金等课题。本书是在作者多年科研成果和教学经验基础之上编写而成的。

本书由唐友刚、沈国光和刘利琴共同编写。具体分工为:唐友刚编写第1章、第6章、第7章、第8章、第10章、第11章;刘利琴编写第3章、第5章;刘利琴、沈国光编写第4章;沈国光编写第2章、第9章;沈国光、唐友刚编写第12章。全书由唐友刚统稿。

在本书编写过程中,参阅了同行专家大量资料和科研成果,特别是参考了天津大学船舶与海洋工程学科多位老师的论文和著作,在此向他们表示衷心的感谢。

本书的出版,得到了天津大学研究生院的资助,部分研究工作得到国家自然科学基金项

目、国家 863 项目和博士点基金项目支持,也向他们表示由衷的谢意。

董艳秋教授对本书出版给予很多帮助,提出了许多有益的建议。研究生沈文君、沈妍、郭东杰等协助整理书稿和校验算例等。在本书付梓之际,作者谨向支持本书出版的所有单位和个人表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者提出宝贵的意见。

作者

2008 年 4 月于天津大学

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 海洋工程结构的发展	(1)
1.2 海洋平台构造及有关动力学问题	(6)
1.3 海洋系泊结构	(10)
1.4 海洋管道	(12)
1.5 海洋工程结构面临的挑战性问题	(12)
第2章 海洋工程结构的确定性载荷	(14)
2.1 海洋工程结构环境载荷综述	(14)
2.2 海浪的确定性描述	(19)
2.3 海洋结构物的波浪载荷	(28)
第3章 单自由度线性结构振动	(40)
3.1 结构体系的单自由度模型	(40)
3.2 建立动力学方程的方法	(47)
3.3 单自由度系统自由振动分析	(51)
3.4 强迫动力响应	(57)
3.5 结构振动的响应函数	(65)
第4章 单自由度线性结构的随机响应	(70)
4.1 平稳各态历程假定	(70)
4.2 均值与概率	(72)
4.3 自相关函数与谱密度	(73)
4.4 互相关函数与互谱密度	(74)
4.5 海浪的统计描述	(75)
4.6 伪随机波的形成	(88)
4.7 结构响应的统计分析	(91)
4.8 结构随机响应的解析方法	(95)
第5章 单自由度结构的非线性振动	(100)
5.1 海洋工程中的非线性振动实例	(100)
5.2 结构体系非线性振动的特点	(103)
5.3 求解非线性振动方程的小参数法	(110)
5.4 求近似解的平均法	(116)
5.5 求近似解的多尺度法	(120)
5.6 单自由度系统的异频振动分析	(125)
5.7 单自由度分段刚度系统的振动分析	(130)

第 6 章 多自由度线性结构振动	(140)
6.1 一般海洋结构的多自由度振动	(140)
6.2 振动方程的建立	(142)
6.3 系统无阻尼自由振动	(152)
6.4 多自由度系统阻尼的处理	(155)
6.5 无阻尼系统强迫振动响应计算方法	(156)
6.6 模态叠加法计算有阻尼强迫振动响应	(158)
第 7 章 多自由度结构系统的非线性与随机振动分析	(160)
7.1 多自由度系统非线性振动分析	(160)
7.2 多自由度系统参数激励振动响应分析	(166)
7.3 多自由度系统随机激励下的动力响应	(169)
第 8 章 大型结构系统的振动分析方法	(177)
8.1 动力问题的有限单元法	(177)
8.2 里茨法及子空间迭代法	(188)
8.3 结构动力响应计算的数值方法	(196)
第 9 章 海流和风引起的结构振动	(208)
9.1 海流和风对结构振动的影响	(208)
9.2 旋涡泄放现象与涡激振动	(208)
9.3 确定性涡激振动响应分析	(211)
9.4 涡激振动的统计响应分析——升力相关模型	(215)
9.5 海风的描述与风载荷	(219)
9.6 湍流风引起的结构振动	(223)
9.7 非圆截面结构的跳跃振动	(225)
9.8 减小涡激振动的工程措施	(228)
第 10 章 海洋连续结构体系振动	(230)
10.1 梁和缆索振动方程与固有振动分析	(230)
10.2 缆索的动力响应分析	(236)
10.3 梁的振动响应分析	(241)
第 11 章 振动理论在平台动力分析中的应用	(249)
11.1 固定式平台的时域振动响应	(249)
11.2 地震激励下平台的振动响应	(254)
11.3 随机波激励下平台振动响应的统计分析	(255)
11.4 导管架平台动力响应的统计分析	(257)
11.5 深海平台张力腿波流联合作用振动分析	(259)
第 12 章 浮式结构的运动分析	(266)
12.1 浮式结构的运动描述	(266)
12.2 铰接塔平台的运动分析	(270)

12.3 铰接塔—油轮运动分析	(272)
12.4 锚泊系统分析	(275)
12.5 二阶波浪力和低频波浪阻尼	(279)
12.6 Spar 平台垂荡—纵摇耦合运动分析	(284)
参考文献	(289)

第1章 绪 论

随着海洋开发与海洋空间利用工程的进展,出现了多种形式的海洋结构物。这些海洋结构物的环境载荷、动力响应特性及其在动力载荷作用下动力响应分析理论,形成了一门崭新的学科,即海洋工程结构动力学。该学科的根本目的在于为海洋工程结构物的设计开发、建造与安装,提供系统的理论分析基础。

海洋工程结构物,包括建造在海洋大陆架或者大陆坡上的所有工程结构物,这些结构物的用途十分广泛,如油气勘探、微波通信、海洋发电及海洋空间利用等。然而,目前海洋结构物的大部分用于海洋油气的勘探、开发、生产及储运。这些结构包括固定式平台、移动式钻井平台、海底管线、油气浮式生产系统、精确定位的深水半潜式平台及顺应式深海平台等。当前人类已经可以在大于2 000 m的深水中进行油气钻探和生产。

在海洋中长期作业的海洋结构物与船舶面临的海洋环境显著不同。船舶可以根据天气预报躲避高幅值的海洋环境载荷,而海洋结构物常年工作在海洋中,承受各种海洋环境力的作用,这要求海洋结构物能够经得起50年或者100年一遇高海情的考验。海洋结构物生存在动力环境中,“生命不息,振动不止”。

本章主要回顾海洋工程结构物的发展,总结不同海洋结构物的形式、用途及现状,提出海洋工程结构物研究开发领域挑战性的问题。

1.1 海洋工程结构的发展

100多年以来,海洋结构物逐渐从浅水进入深水,油气开发装备从固定式发展到顺应式。图1-1反映了海洋油气开发平台的进程,从左至右依次为:第1为固定式平台,一般作业水深不超过500 m;第2为顺应式平台,作业水深范围为500~800 m;第3、4分别为微型TLP(张力腿平台)和传统型TLP,作业水深为1 000~2 000 m;第5为浮式生产设施,作业水深为200~2 000 m;第6、7分别为桁架式Spar平台和经典的Spar平台,作业水深为1 500~3 000 m。人类最早的石油开采,可以追溯到1887年,在加利福尼亚南部圣巴巴拉附近海域采用木质结构钻塔实施钻井,见图1-2。

1920年,委内瑞拉在马拉开波湖发现油田。该湖水深3.5~4.3 m。为开采湖底石油,建造了木结构石油钻井平台,它被认为是世界上第一座固定式海洋平台。1930年,前苏联在里海采用人工岛的方式钻井和采油。从1897年到20世纪40年代初,是海洋石油开发的初始阶段。

1947年美国在墨西哥湾6 m水深海域建造了世界上第一座钢结构固定平台,见图1-3。目前,世界上最大的导管架固定式平台是1988年建成的位于墨西哥湾的Bullwinkle号。该海域水深412 m,平台总重超过77 000 t。在英国北海建造采油平台最大问题是风速高达39 m/s,

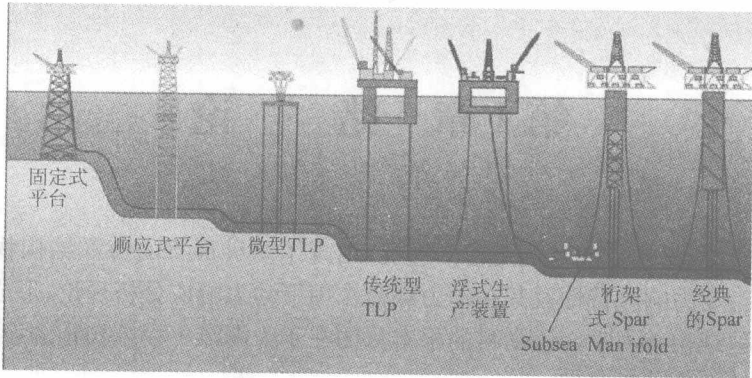


图 1-1 海洋油气开发平台

波高 30 m, 而且持续时间很长, 为了缩短海上安装时间, 采用了重力式混凝土平台, 其完全依靠自身重量保持定位和稳定性, 图 1-4 ~ 图 1-6 分别为导管架平台、单腿和多腿混凝土平台。



图 1-2 圣巴巴拉海域木制采油平台



图 1-3 世界上第一座钢结构固定平台



图 1-4 导管架平台

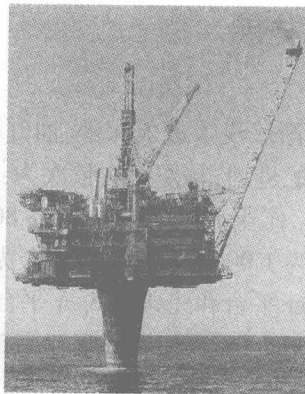


图 1-5 单腿混凝土平台



图 1-6 多腿混凝土平台

实施海上钻井的主要装备包括自升式钻井平台、半潜式钻井平台、动力定位钻井船等三种, 分别如图 1-7 ~ 图 1-9 所示。1937 年出现了钻机安装在驳船上的第一座驳船式钻井平台。1949 年第一座坐底式可移动平台应用在墨西哥湾。1954 年建造了第一座自升式钻井平台“加利福尼亚 1 号”。到 1974 年, 活动自升式钻井平台已经能够在 105 m 的水深作业。1962 年世界上出现了第一座半潜式钻井平台“蓝水一号”。目前, 深水半潜式钻井平台有三种定位方

式,即锚索辐射系泊方式、推进器动力系统、锚索系泊加动力定位。多功能半潜式平台可抵抗 100~120 kn 风速的飓风 and 16~32 m 的波浪,Deepwater Horizon 号工作水深达 3 048 m。



图 1-7 自升式钻井平台

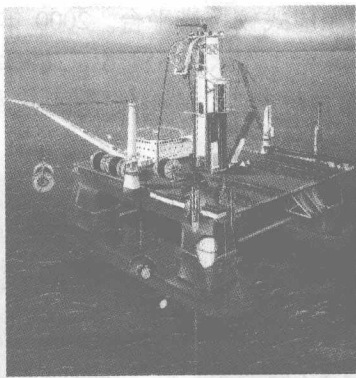


图 1-8 半潜式钻井平台

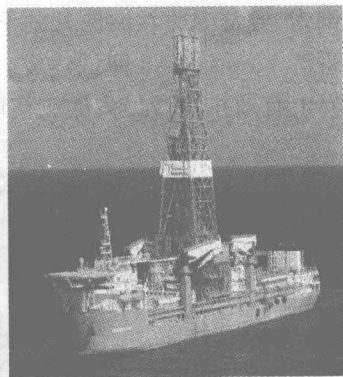


图 1-9 动力定位钻井船

浮式生产系统(Floating Production Storage and Offloading system,简称 FPSO)概念于 1947 年提出。1958 年,世界上第一套单点系泊系统在瑞典作为“海上加油站”成功投产;1966 年,第一艘浮式生产储油轮(Floating Production Storage Unit, FPSU)在墨西哥湾投入使用,它和单点系泊装置、3 座固定平台组成一套浮式生产系统。浮式储油轮在海上定位方式包括:图 1-10 所示的软刚臂单点系泊、图 1-11 所示的铰接塔单点系泊及图 1-12 所示的转塔式系泊等三种。1977 年 8 月,西班牙壳牌(Shell)公司首次将一艘商业油船改装成浮式生产储卸油装置,用于水深 117 m 的地中海卡斯特伦油田。1999 年 Seillean 号 FPSO 在水深 1 853 m 的巴西龙卡多尔油田作业。到 2005 年,全世界共有 123 个浮式生产储油装置投产,图 1-13 为半潜浮式生产装置。

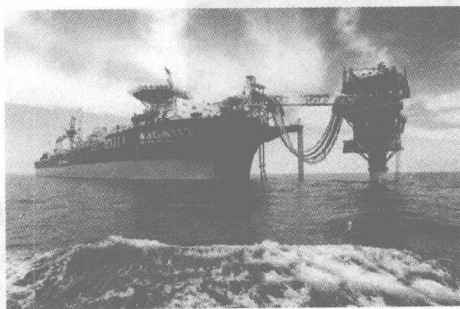


图 1-10 软刚臂系泊浮式生产系统图



图 1-11 铰接塔单点系泊生产系统

到 20 世纪 70 年代,在海洋大陆坡 200~2 000 m 范围内发现了油气资源。导管架平台的作业水深已经达到 300 m,接近它的经济极限,因此提出了顺应式平台的概念。图 1-14 所示的牵索塔平台与铰接塔平台均为顺应式平台。顺应式平台随风浪运动,而不像固定式平台在风浪作用下岿然不动,与海洋载荷对抗。1954 年,美国人 Marsh 率先提出了倾斜系泊索群固定牵索塔平台,第一座牵索塔平台是 20 世纪 80 年代初安装在墨西哥湾的 Lena 号,作业水深 300 m。为了解决牵索安装施工难度大的问题,牵索塔平台去掉了斜拉索,相应在塔柱水面附近增加浮力舱,此种结构形式称为铰接塔,它可以用于钻采平台、装载终端及单点系泊等。1990 年,世界上第一座铰接塔作为单点系泊终端安装在澳大利亚西北海岸的东帝汶海域。世

世界上第一座用于采油的 Baldpate 铰接塔平台于 1998 年 6 月建成,位于墨西哥湾 Garden Banks 260 区海域,该平台工作水深 502.3 m,塔高 580 m,设计油井数量 18 口,是世界上第一座没有钢索、铰接安装在海床基础上的顺应式铰接塔平台。2000 年,铰接塔平台 Petronius 号在墨西哥湾 Viosca Knoll 海域建成。该平台工作水深 534.6 m,塔体自重 43 000 t。截至 2006 年,世界上有效排水量最大的铰接塔平台位于西非安哥拉第 14 区海域,有效排水量为 43 500 t。

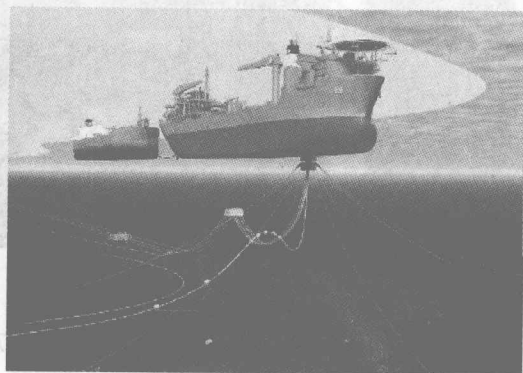


图 1-12 转塔式系泊浮式生产系统

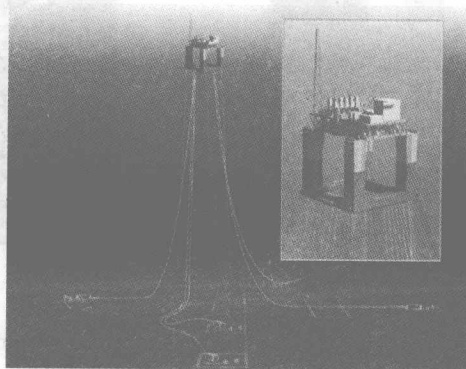


图 1-13 半潜浮式生产装置

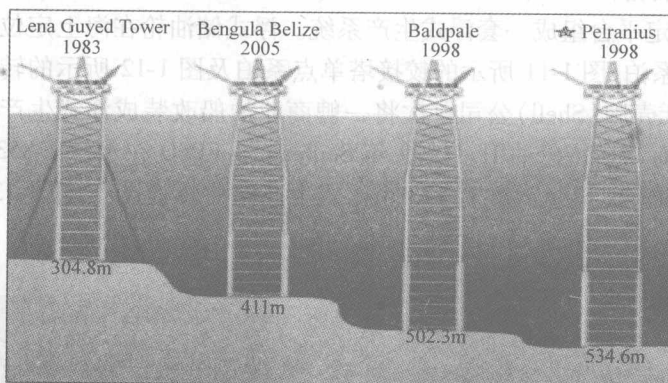


图 1-14 牵索塔平台与铰接塔平台

牵索塔平台和铰接塔平台的不足之处是随水深的增加,平台运动的稳定性降低,因此在牵索塔平台的基础上发展了张力腿平台(Tension Leg Platform, TLP)。1984 年,Conoco 公司在欧洲北海 157 m 水深的 Hutton 油田安装了世界上第一座张力腿平台。目前,张力腿平台的工作水深已达 1 250 m。其结构形式主要有以下几种:大载荷 TLP(图 1-15),造价昂贵,张力筋腱自重过大;Mini-TLP(图 1-16),运动性能优越,重量轻;扩展型 TLP(图 1-17),在主体设计上的改进使该平台用钢量大大减少,属于经济型平台。

深海油气生产的另外一种优秀平台是单柱式平台或称为 Spar 平台。1987 年,美国人 Edward 首次提出了深水单柱式平台即 Spar Platform 概念。1996 年,在墨西哥的 Neptune 油田,成功建造安装了世界上第一座单柱式生产平台,工作水深为 588 m。Spar 平台目前可分为三代。第一代为经典 Spar 平台(Classic Spar),在役平台最大作业工作水深为 1 463 m,它是 1999 年安装在墨西哥湾的 Hoover 平台。第二代为桁架式 Spar(Truss Spar)平台,其最大优点是运动性能更好且造价更低。2001 年,世界上第一座桁架式 Spar 平台在墨西哥湾安装下水;2004

年, BP 石油公司在墨西哥湾建造了 Mad dog 桁架式 Spar 平台, 工作水深 1 347 m, 其最大特点是采用尼龙缆系泊, 从而显著减轻了主体重量。第三代为多柱式平台 (Cell Spar), 其建造安装便利, 建造费用低。世界上第一座 Cell Spar 平台在美国得克萨斯州 (Texas) 的 Aransas 建造, 主体总高度 171 m, 工作水深 1 500 m。图 1-18 从左至右依次为经典 Spar 平台、桁架式 Spar 平台和多柱式 Spar 平台。

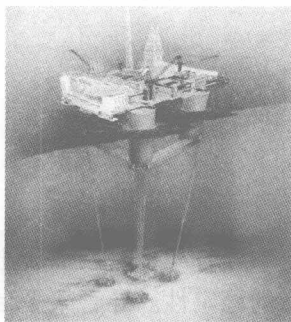


图 1-15 大载荷 TLP

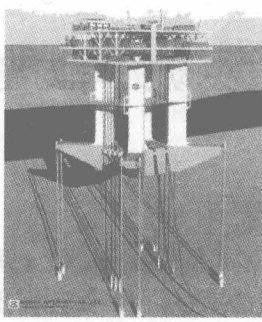


图 1-16 Mini-TLP



图 1-17 扩展型 TLP



图 1-18 三代 Spar 平台

随着各类顺应式海洋结构物定位的需要, 海洋结构物的系泊技术也得到了相应发展。早期的系泊系统由贯入海底的桩或者锚与缆索连接构成, 缆索材料为棕绳或者钢链。随着深海开发工程的发展, 新型系泊结构和材料不断涌现。国际上单点系泊技术的兴起是在 20 世纪 50 年代末、60 年代初。目前, 深海系泊系统逐渐发展成为三种类型: ①锚链悬链线半张紧系泊, 一般水深不大于 1 000 m; ②链-钢缆-链系泊, 水深大于 1 000 m; ③链-尼龙缆-链全张紧系泊, 经济性能优越, 更适合深海平台定位的需要。

海洋油气输送的重要装备是海底管线。在 20 世纪 60 年代, 提出了海底管道较完善的分析方法和布置措施, 管线系统发展成两大主要形式, 即海底管道和垂直立管。从 1986 年起, 全世界新的海洋管线以每年 1 000 km 的速度增长, 单条管道长度从 1 km 增加到 1 000 km, 管道直径从 7 cm 增大到 152 cm。目前, 世界上最长的管线是挪威 1992 年建成的从特罗利延伸至

比利时的 1 000 km 长的管线。最大直径的管道为 152 cm, 铺设在科威特。目前最深的海底管线是墨西哥海湾的输气管线, 其直径和水深分别为 46 cm 和 1 400 m。

回顾海洋工程结构物的发展历程, 可以看出有两个基本特点: 一是从浅水逐渐向深水发展, 从最初不足 10 m 水深, 发展到超过 2 000 m 深的海域作业; 二是从固定式结构向顺应式结构发展。下面进一步阐述不同海洋结构物的构造特征、工作原理及动力学问题。

1.2 海洋平台构造及有关动力学问题

1.2.1 固定式平台和活动式平台

在小于 400 m 水深的海域中, 固定式平台有混凝土重力式平台和导管架平台。混凝土重力式平台通过自身的重量维持合适的垂直位置, 保证在土壤基础上的稳定性。导管架平台结构的共同特点是将钢管桩腿插入土壤一定深度, 以支持平台结构和作业模块的重量。对于所有的导管架结构, 它的固有弯曲频率或基本弯曲频率大约是 0.17 Hz。

用于勘探石油的自升式钻井平台也可称为活动式平台。此平台由 3~6 根桩腿支撑, 桩腿有钢管式和桁架式两种结构。在钻井状态, 每根桩腿固定于海底的钢质沉垫上, 可以使平台结构稳定, 并且减小桩腿插入海底的深度。在软质土壤中, 桩腿通过桩靴插入土壤的深度可达 70 m, 平台的船体在海底以上的高度可达到 100 m。迁移作业海域时, 桩腿从海底拔出, 并且收进船体的底部, 以减小拖航阻力。

固定式平台和活动式平台共同的结构特征是, 上部生产结构模块达到数千吨, 远大于支撑结构的重量, 结构高度方向的尺寸大于水平方向的尺寸, 主要的振动形式为弯曲振动。惯性力主要来自上部作业模块的质量, 而恢复刚度主要取决于支撑结构。一般固定式平台承受的动载荷主要是风、浪、流和海冰, 对于混凝土平台和导管架平台, 还要考虑地震载荷。钢质导管架平台和作业状态的自升式钻井平台, 在大于 100 m 水深作业时, 波流联合引起的动力响应是十分重要的问题。

1.2.2 顺应式平台

顺应式平台包括牵索塔平台和铰接塔平台。如水深不大于 800 m, 海洋结构物可以采用牵索塔结构或者铰接塔结构。

牵索塔包括桁架式塔架和连接到海底基础上的缆索。此类平台运动时具有风标效应, 可减小风浪载荷。该结构的工作水深可达到 400 m, 在水面以下 25 m 处, 塔结构四周对称地系上 20 根钢索, 以保证塔架结构的稳定性。每根钢索向下延伸约 1 000 m, 与在海底锚固的加重链相连。在正常天气或小风暴情况下, 钢缆犹如一坚硬的弹簧; 而在大风暴和飓风等恶劣的气象条件下, 钢缆变得柔软, 以便结构顺应风浪流载荷的作用。也就是说, 平台摇摆幅值的增加大于载荷增加的速度时, 将增大海底链提离海底的高度, 平台恢复能力增加, 使平台适应风暴载荷。图 1-19(a) 为牵索塔示意图。

铰接塔的基本构造有两种, 即圆柱式塔柱和桁架式塔架。细长的塔柱结构与海底基础通过万向铰接头连接, 塔柱上有钻井和采油装置, 塔柱水面以上有浮力舱, 海底基础以上有压载

舱。浮力舱和塔柱提供足够的浮力和摇摆恢复力矩,依靠平台自身的巨大浮力力矩使塔柱适应海浪作用轻微摆动。该类型结构的固有频率远低于那些具有高幅值的波浪频率,一般不会发生摇摆共振。图 1-19(b)为铰接塔平台示意图。

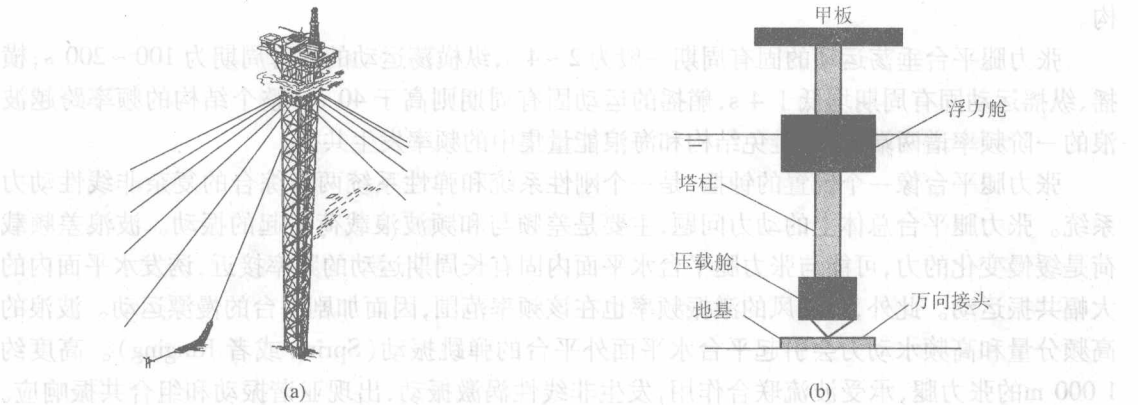


图 1-19 顺应式平台示意图
(a) 牵索塔平台; (b) 铰接塔平台

铰接塔作为生产平台时,塔柱摇摆运动的浮力力矩和流体动力均是非线性的,它在高海情下运动的失稳及运动跳跃导致平台生产功能的丧失。此外,对于大长细比塔柱结构,需要考虑弹性变形,研究塔柱的运动和塔柱振动问题。

1.2.3 浮式平台

浮式平台及装置包括 TLP 平台、Spar 平台、半潜式平台及不同类型的浮式生产装置,这是深水油气开发的主要装备。

1. 深水平台

1) 张力腿平台

张力腿平台是一种垂直系泊的半顺应半刚度式平台。它一般由五大部分组成,分别是平台上体、立柱(含横撑和斜撑)、下体(浮箱)、张力腿系泊系统和锚固基础(张力腿和桩基),如图 1-20 所示。

平台上体位于水面以上,它由作业装备和生活舱室构成,通过 4 根或 3 根立柱与下体(圆柱形结构)连接。立柱一般为圆柱形结构,其主要作用是为本体提供必要的结构刚度。平台的浮力由立柱和位于水面以下的下体浮箱提供。张力腿一般为 4 个。每个张力腿由 2~4 根张力筋腱组成,上端固定在平台本体上,下端与海底基座模板相连。有时还要增加侧向系缆,以增加平台侧向系泊刚度。张力腿平台通过自身的结构形式,产生远大于结构自重的浮力。浮力除了抵消平台自重外,剩余浮力与张力腿的预张力平衡,使张力腿时刻处于受张拉的绷紧状态,从而显著提高了系索的刚度。预张力使平台平面外的运动(横摇、纵摇和垂荡)较小,近似于刚

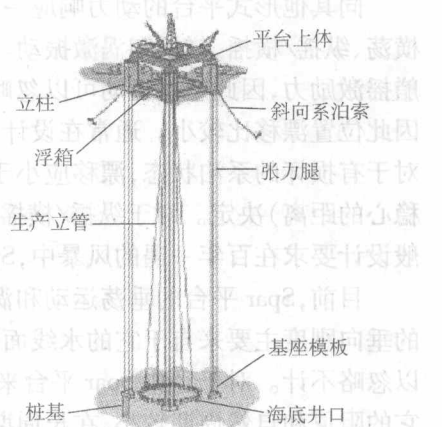


图 1-20 张力腿平台基本结构

性。平台本体主要是直立浮筒结构,浮筒所受水平方向波浪力较大,因而通过张力腿在平面内的柔性,实现平台水平面内的运动(纵荡、横荡和艏摇),即为顺应式。这样,较大的环境载荷能够通过惯性力来平衡,而不需要通过结构内力来平衡。所以张力腿平台为半顺应半刚性结构。

张力腿平台垂荡运动的固有周期一般为 2~4 s,纵横荡运动的固有周期为 100~200 s;横摇、纵摇运动固有周期均低于 4 s,艏摇的运动固有周期则高于 40 s。整个结构的频率跨越波浪的一阶频率谱两端,可以避免结构和海浪能量集中的频率发生共振。

张力腿平台像一个倒置的钟摆,是一个刚性系统和弹性系统两者综合的复杂非线性动力系统。张力腿平台总体上的动力问题,主要是差频与和频波浪载荷引起的振动。波浪差频载荷是缓慢变化的力,可能与张力腿平台水平面内固有长周期运动的频率接近,诱发水平面内的大幅共振运动。此外,紊流风的激振频率也在该频率范围,因而加剧平台的慢漂运动。波浪的高频分量和高频水动力会引起平台水平面外平台的弹跳振动(Spring 或者 Ringing)。高度约 1 000 m 的张力腿,承受波流联合作用,发生非线性涡激振动,出现亚谐振动和组合共振响应。考虑来自张力腿的预张力和动态张力,张力腿承受横向波流载荷和轴向激振力,发生参数激励振动,这是导致张力腿结构的大幅振动和失稳的重要原因。

2) Spar 平台

Spar 平台,整体组成一般分为 6 大系统,即平台上体、主体外壳、浮力系统、中央井、立管系统、系泊系统。从结构上来讲,则将 Spar 平台分为 3 部分,即平台上体、平台主体以及系泊系统(包括锚固基础),其中平台上体和平台主体并称为平台本体。Spar 平台的本体结构如图 1-21 所示。

图 1-21 中螺旋侧板用于消除旋涡,减小圆柱形主体外壳的涡激振动,同时增加升沉和摇摆运动的阻尼。传统的系泊缆索为链-钢缆-链结构,在一定预张力作用下形成半张紧状态,在其重力作用下形成悬链线。随着平台作业水深的增加,采用张紧聚酯纤维缆系泊,通过施加预张力,缆呈拉紧形状,从而可以减轻缆的重量和减小系泊缆覆盖的水域。

同其他形式平台的动力响应一样,对 Spar 平台运动响应的研究主要考虑垂荡运动、纵荡/横荡、纵摇/横摇、艏摇和涡激振动。由于 Spar 平台壳体具有柱形结构,所以通常受到很小的艏摇激励力,因此艏摇运动可以忽略不计。而 Spar 的半张紧系泊装置使其水平刚度比较大,因此位置漂移比较小。通常在设计 Spar 平台时,对于完整系泊状态,要求漂移小于 4% 水深;对于有损坏的系泊状态,漂移应小于 6% 水深。Spar 平台的纵摇/横摇刚度由 GM 值(重心和稳心的距离)决定。对于纵摇/横摇运动性能的要求,通常来自于立管和顶层模块的设计。一般设计要求在百年一遇的风暴中,Spar 平台的最大组合纵摇/横摇角小于 10° 。

目前,Spar 平台的垂荡运动和涡激振动是两个受到比较广泛关注的研究方向。Spar 平台的垂向刚度主要来自于它的水线面面积。系泊系统的垂向刚度与静水压力引起的刚度相比可以忽略不计。对于经典 Spar 平台来说,由于 Spar 平台的圆柱体形状以及恒定的横截面面积,它的阻尼和自然周期较小,在长周期涌的条件下,将产生一个线性激励垂荡共振运动,从而使一阶波浪力比二阶差频波浪力变得更为重要。在共振的情况下,垂荡响应会急剧地增大,并会产生纵摇耦合运动。Spar 平台上具有较多的圆柱形构件,在一定的雷诺数范围内,旋涡自主体上周期性地脱落,造成作用在弹性主体上的周期激振力引起涡激振动。在旋涡脱落的激振力作用下,如果柱体的自振频率和激振频率接近,就会产生共振,进而产生大幅度的变形和运

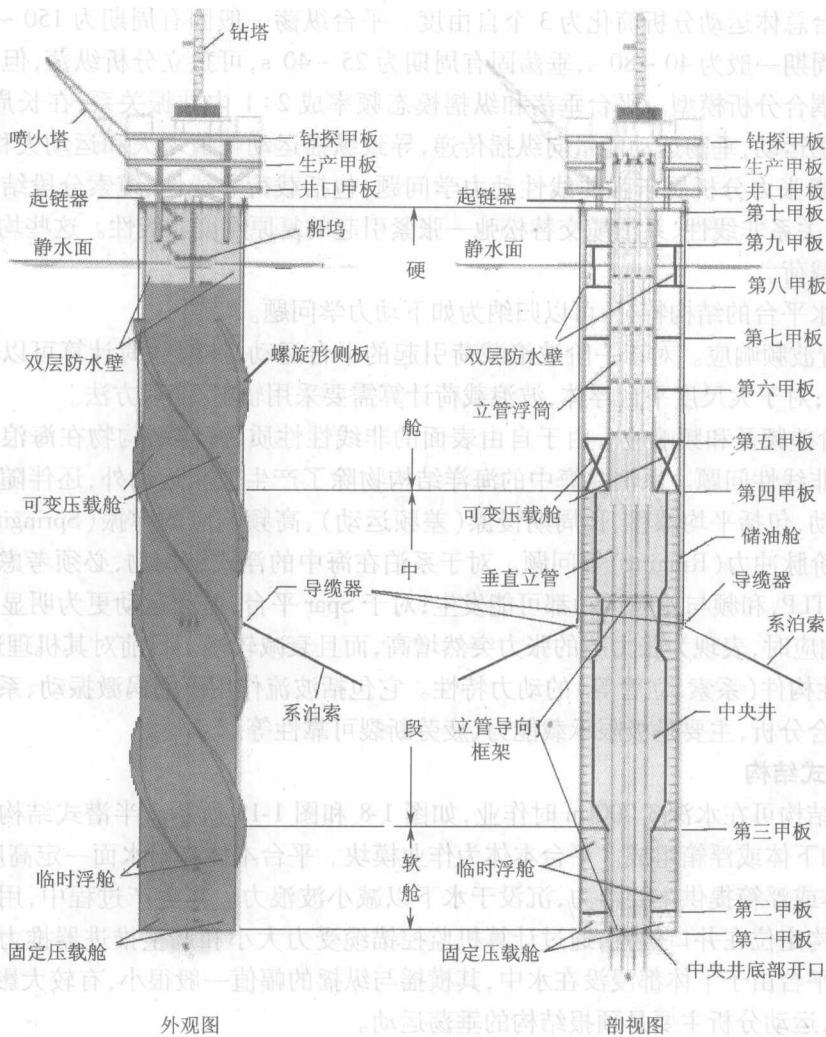


图 1-21 经典 Spar 平台结构示意图

动。试验发现,当来流的无量纲速度处于一定的范围内时,旋涡脱落的频率不再随来流速度而增加,而是与柱体的自振频率保持一致,从而产生振动锁定(Lock-in)效应。锁定效应扩大了共振范围,引起结构的大幅度振动,同时由于波浪质点的往复运动,造成圆柱前后都有旋涡脱落,水流流动和主体受力情况更为复杂。对 Spar 平台来说,环流和它们产生的旋涡会在海平面下保持较高的速度,在整个 Spar 平台壳体上产生很大的应力。涡激振动会对系泊系统和立管产生疲劳损害,减小整个平台的疲劳寿命,同时增大壳体上的拖曳力。试验表明,平台上的圆柱形结构物,如立管、浮筒等最容易受到涡激振动的影响,而且其他形状的构件也会产生不同程度的涡激振动,同时,风暴流同样可以使 Spar 平台产生较大的涡激振动。为了增加阻尼,传统 Spar 平台壳体表面上安装螺旋侧板,可以有效减小涡激振动。对于桁架式 Spar 平台,除了在上部壳体表面安装螺旋侧板外,在下部桁架部分还要安装垂荡板,通过垂荡板增大 Spar 平台的垂荡附加质量和垂荡阻尼。螺旋侧板和垂荡板结构水动力特性研究也是 Spar 平台需要研究的重要问题。