



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

海洋工程施工与安全

• 娄 敏 张 敬 主编 •



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

海洋工程施工与安全

娄敏 张敬 主编



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程施工与安全 / 娄敏, 张敬主编. — 东营:
中国石油大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5636-5049-1

I. ①海… II. ①娄…②张… III. ①海洋工程—工程
施工 ②海洋工程—工程施工—安全技术 IV. ① P75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 311301 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 海洋工程施工与安全

作 者: 娄 敏 张 敬

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 13.25 字数: 304 千字

版 次: 2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 27.00 元

preface



前言

石油在未来相当长的时间内仍然是全球最重要的基础能源,关系到一个国家的综合国力、经济发展水平和人民生活水平,因此,石油资源成为世界各国激烈争夺的对象。随着人类生产活动的迅速发展,陆地石油资源已远远不能满足人类对能源的需求,海洋石油资源的开发利用成为人类共同面临的重大课题。

“海洋工程施工与安全”是以海洋石油开发为特色的船舶与海洋工程专业的重要专业课程,但到目前为止,还没有一本系统讲授海洋工程施工与安全知识的教材。为了满足教学的需要,也为了满足从事海洋工程施工领域科技人员学习的需要,中国石油大学(华东)海洋工程施工与安全编写组融合多年的教学和科研经验,经过七年的努力,将本书奉献给读者。

本书分为八章,其中第一章为绪论部分,介绍海洋油气开发概况、海洋平台类型及海洋工程施工过程;第二章到第五章主要介绍海洋工程施工的通用知识,包括海洋平台用钢及其加工工艺、海洋平台结构焊接、海洋平台结构加工设计、吊装工程等;第六章到第八章主要对具体海洋工程施工进行详细的介绍,包括导管架平台建造与安装、深水平台施工及海底管道施工等。

本书由中国石油大学(华东)石油工程学院的娄敏、张敬共同编写。娄敏编写了第一章、第二章、第三章、第六章和第八章,张敬编写了第四章、第五章和第七章,全书由娄敏统稿。

限于编者水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正!

编 者

2015年12月



第一章 绪 论	1
第一节 海洋油气开发概况	1
第二节 海洋平台分类	2
第三节 海洋工程施工过程	8
第二章 海洋平台用钢及其加工工艺	11
第一节 海洋平台用钢	11
第二节 海洋平台构件加工工艺	22
第三章 海洋平台结构焊接	30
第一节 海洋平台结构的焊接要求	30
第二节 焊接方法	33
第三节 焊接工艺	38
第四节 焊前工艺准备和焊后工艺处理	42
第五节 焊接应力和焊接变形	45
第六节 焊接检验	59
第四章 海洋平台结构加工设计	61
第一节 概 述	61
第二节 管节点数学模型	64
第三节 加工设计图纸	79
第五章 吊装工程	86
第一节 起重机	86
第二节 吊装总则	98
第三节 吊装方法	100
第六章 导管架平台建造与安装	104
第一节 场地布置	104
第二节 导管架建造工艺	114
第三节 组块建造工艺	120
第四节 导管架下水和安装	127



第五节 组块安装	135
第七章 深水平台施工	139
第一节 半潜式平台施工	139
第二节 张力腿平台施工	150
第三节 单柱式平台施工	164
第八章 海底管道施工	174
第一节 海底管道概况	174
第二节 海底管道陆上预制	178
第三节 海底管道铺设方法	185
第四节 立管安装	197
第五节 挖沟埋管技术	201
参考文献	203

第一章 绪 论

第一节 海洋油气开发概况

随着社会的发展和科学技术的进步,人类对能源的需求越来越大。当陆上石油资源经过长时期、大规模的开发之后,世界范围内的油气勘探与开发转向了资源丰富的海洋,并逐渐形成了投资高、风险大、高新技术密集的能源工业新领域。世界海洋总面积为 $3.62 \times 10^8 \text{ km}^2$,占地球总面积的 71%,海洋石油储量极为丰富,根据世界地质学家的预测,海底石油和天然气的总储量为 $(1\ 000 \sim 2\ 500) \times 10^8 \text{ t}$,相当于世界陆地石油天然气探明总储量的两倍。

目前世界海洋石油产量已占海陆石油总产量的 1/4 以上,随着海洋石油勘探和开发技术水平的不断提高,海洋石油的产量将会进一步增加。

一、国际海洋油气开发历史

(1) 海洋油气勘探开发始于 20 世纪 20 年代,最早进入近海油气开发的国家当属美国,早期的钻井工作是把钻机放在驳船上进行的。

(2) 20 世纪 30 年代初,美国德克萨斯能源公司率先在路易斯安那州距海岸线 1.6 km 的海域钻了第一口井,从此掀开了海上油气勘探开发的序幕。此后,石油钻井公司纷纷在近海海域进行大规模的勘探钻井活动。

(3) 到 20 世纪 40 年代末,以固定式采油平台为主体的海上采油方式问世,第一座固定式平台位于离路易斯安那州海岸线 19 km 的海域,之后近海钻井速度逐渐加快,海上固定式平台的数量也在不断增加。

(4) 到 20 世纪 50 年代,有 90 多座固定式海上平台先后投产,平台水深在 30 m 范围内。

(5) 到 20 世纪 60 年代末,所建平台已经达到 500 多座,水深突破 100 m。

(6) 20 世纪 70 年代,壳牌石油公司率先在墨西哥湾进入水深超过 300 m 的深海区作业,在水深 317 m (1 040 ft) 处建造了一座 Cognac 平台,该平台的高度超过了帝国大厦。

(7) 目前海上油气生产已经可以在超过 3 000 m 水深的海域进行。

二、中国海洋油气开发现状

中国海上油气开发比较晚,开始于 20 世纪 60 年代,1967 年 6 月渤海海 1 井投产,

该地区的典型水深约为 20 m。到 80 年代末期,在南中国海海域的联合勘探和生产开始在水深 100~400 m 的范围内进行。2005 年 2 月,中国海洋石油总公司与科麦奇中国石油有限公司签署了南海东部珠江口盆地 43/11 深水(1 500~3 000 m)区块石油勘探开发合同,这表明南海深水油气资源将成为中国海洋石油勘探、开发的主战场。中国现有的海上油气田情况见表 1-1。

表 1-1 中国近海油气田分布

序 号	名 称	地理位置	平均水深/m
1	埕北油田	渤海湾西部	16
2	秦皇岛 32-6 油田	渤海湾中部	20
3	绥中 36-1 油田	渤海辽东湾北部	31
4	锦州 9-3 油田	渤海辽东湾北部	8
5	锦州 20-2 凝析油气田	渤海辽东湾北部	18
6	渤中 34-2/4 油田	渤海中日合同区南部	20.5
7	渤西油田群	渤海西部海域	10
8	陆丰 22-1 油田	南海珠江口盆地	332
9	陆丰 13-1 油田	南海珠江口盆地	146
10	西江 24-3 油田	南海珠江口盆地	100
11	西江 30-2 油田	南海珠江口盆地	99
12	流花 11-1 油田	南海珠江口盆地	310
13	惠州油田	香港东南方 160 km	107
14	崖城 13-1 气田	南海西部莺歌海盆地	100
15	东方 1-1 气田	南海西部莺歌海盆地	87
16	涠西南油田群	南海北部湾	43
17	文昌 13-1/2 油田	海南省文昌市以东约 132 km	117
18	平湖油气田	东海大陆架,上海东南 40 km	约 100
19	春晓油田	浙江宁波市东南 350 km 的东海海域	87

第二节 海洋平台分类

用于海洋石油勘探与开发的各种海洋平台可分为海上固定式平台和移动式平台。

一、海上固定式平台

上部伸出海面,用桩(或扩大基础),或张力装置,或万向铰(或有连接节的柱子),或绳索来支承或固定于海底,为一定的目的较长时间保持固定位置的结构称为海上固定式结

构物或海上固定式平台,如导管架平台、重力式平台、张力腿平台、顺应塔式平台、单柱式平台等。海上固定式结构物按其支承的刚度又可分为刚性支撑的固定式结构物(如导管架平台、重力式平台)和柔性支撑的固定式结构物(如张力腿平台、顺应塔式平台、单柱式平台)。

1. 导管架平台

导管架平台主要由四大部分组成:导管架、桩、导管架帽和甲板模块,如图 1-1 所示。但在许多情况下,导管架帽和甲板模块合二为一。

导管架:钢质桁架结构,由大直径、厚壁的低合金钢管焊接而成。钢质桁架的主柱(也称大腿)作为打桩时的导向管,故称导管架。其主管可以是三根的塔式导管架,也有四柱式、六柱式、八柱式等,视平台上部模块尺寸大小和水深而定。导管架腿之间由水平横撑与斜撑、立向斜撑作为拉筋,以起到传递负荷及加强导管架强度的作用。

桩:导管架依靠桩固定于海底。桩有两种形式:①主桩式,即所有的桩均由主腿内打入;②裙桩式,即在导管架底部四周布置桩。裙桩一般是水下桩。

甲板模块:也称组块,由各种组块组成平台甲板,如钻井区域的模块称为钻井模块,采油生产处理区的称为生产模块,机械动力区的称为动力模块,生活区的称为生活模块等。平台可以是一个由多层甲板组成的结构,也可以是由单层甲板组成的结构,视平台规模大小而定。

导管架平台的优点:

- (1) 技术成熟、可靠;
- (2) 在浅海和中深海区域使用较为经济;
- (3) 海上作业平稳和安全。

导管架平台的缺点:

- (1) 随着水深的增加,费用显著增加;
- (2) 海上安装工作量大;
- (3) 制造和安装周期长;
- (4) 当油田预测产量发生变化时,对油田开发方案进行调整的适应性受到限制。

2. 重力式平台

重力式平台是与导管架平台不同的另一种形式的平台,它不需要用插入海底的桩去承担垂直荷载和水平荷载,完全依靠本身的重量直接稳定在海底,如图 1-2 所示。根据建造材料的不同,重力式平台又分为混凝土重力式平台和钢质重力式平台两大类。

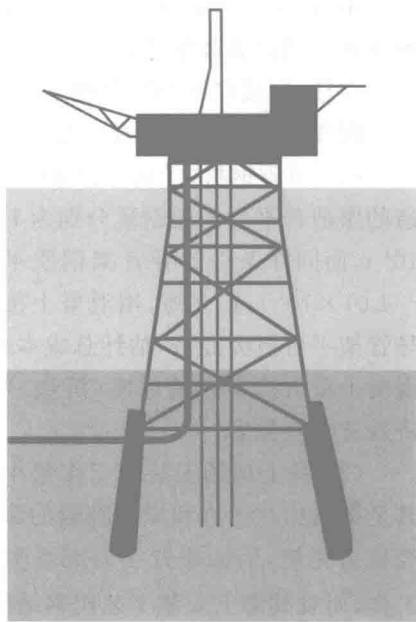


图 1-1 导管架平台



1) 混凝土重力式平台

混凝土重力式平台由沉垫、甲板和立柱三部分组成。

沉垫:底座,是整个建筑物的基础。为了抵抗巨大的风浪推力,要求平台有很大的底座结构,而较大的底座又正好可以用来储存原油,这就使得混凝土重力式平台具备了把钻、采、储三者兼顾起来的优点。

甲板:为生产提供工作场所,在甲板上可安装各种生产处理设施和生活设施。

立柱:连接在沉垫和甲板之间,用于支撑甲板。

混凝土重力式平台的优点:

(1) 节省钢材,经济效果好。例如,两座挪威建造的康迪普平台的耗钢量分别为 1.2×10^4 t 和 1.5×10^4 t,而同样条件的导管架钢质平台耗钢量达 $(2.0 \sim 4.0) \times 10^4$ t;在北海,用混凝土重力式平台比钢质导管架平台更为经济,估计总成本可节省 20%,而且混凝土重力式平台的底座(沉垫)可以储油,因而经济效益十分显著。

(2) 海上现场安装的工作量小。这主要是因为其全部结构在干坞和岸边隐蔽的深水施工水域中已经建造完毕,因而避开了海况恶劣的深水现场安装工作,而且其海上安装工艺比钢结构安装工艺简单,不需要在海底打桩。

(3) 甲板负荷大,在立柱中钻井安全可靠。

(4) 防海水腐蚀、防火、防爆性能好,维修工作量小,费用低,使用寿命长。

混凝土重力式平台的缺点:

(1) 对地基的要求高。由于受巨大风浪力和地震力等的影响,混凝土重力式平台对地基的要求远比导管架平台高,这是区别于导管架平台的显著特点之一。一座混凝土重力式平台能否正常工作,除取决于它本身的结构强度外,另一个重要的因素就是看它是否稳坐在海底,因此,基础设计得好坏常成为混凝土重力式平台成败的关键。

(2) 结构分析比较复杂,制造工艺复杂。

(3) 岸边需有较深的、隐蔽条件较好的施工场地和水域。

(4) 拖航时阻力大,冰区工作性能差。

2) 钢质重力式平台

除混凝土重力式平台外,钢质重力式平台也是重力式平台的一个重要分支。整个钢质重力式平台由沉箱、支撑框架和甲板三部分组成,沉箱兼作储罐。建造时,先将各个沉箱、支撑框架、甲板分别进行预制,而后在岸边组装成整体,再拖运到井位下沉安放。

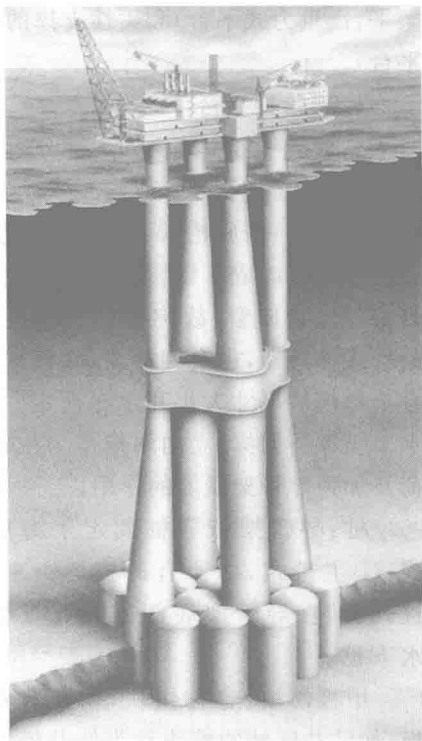


图 1-2 重力式平台

由于钢质重力式平台比混凝土重力式平台轻得多,所以预制过程中不需要较深的施工水域,拖航时要求的拖航马力小,使用中对地基承载力的要求也不高。虽然钢质重力式平台避免了混凝土重力式平台的许多缺点,但在省钢材、耐腐蚀、储油量、隔热等方面都不如混凝土重力式平台。

3. 张力腿平台

张力腿平台可以看作一个垂直锚系的半潜式平台(见图 1-3)。虽然张力腿平台不储油、不装油,但这种平台是开发深水油田的一种具有很大竞争力的形式。这种结构的外形减小了垂向波浪力的影响,因而也就减小了系泊系统的受力变化;上部结构设计成足以承受油田开发各个阶段的载重量,不论在拖航条件下,还是在垂直系泊时都能保持稳定。

张力腿平台的优点:

(1) 平台由张力腿固定于海底,平台运动很小,几乎没有竖向移动和转动,整个结构很稳定。

(2) 可以使用干式采油树,使钻井、完井、修井等井口作业简单,便于维修;由于在水面上进行作业,因此可降低采油操作费用。

(3) 能同时具有顶张力立管和悬链线立管。

(4) 技术成熟。

张力腿平台的缺点:

(1) 对上部结构的重量非常敏感;

(2) 没有储油能力。

4. 顺应塔式平台

所谓顺应塔式平台,是指在海洋环境荷载作用下,围绕支点可发生允许范围内某一角度摆动的深水采油平台,如图 1-4 所示。这种平台是一种细长的框架结构,沿高度方向的横截面一般不变,框架每隔一定的高度有重复的结构形式,井槽在平台的中部。有的顺应塔式平台在每个角落各有数根桩支撑,桩穿过导管打下后,桩顶部高出泥线某一高度,套管约上至平台高度的一半,桩与导管架之间灌注水泥浆,水泥浆凝固后便组成一套管与桩的组合物,在这个组合体的顶部连接导管架。这样大的长度可提供足够的轴向弹性以产生柔性恢复力,调整组合体的长度可得到系统适应不同环境的结构参数。有的顺应塔式平台用一些浮筒来产生恢复力,浮筒也可给平台提供向上的浮力,从而减少结构的轴向压力。

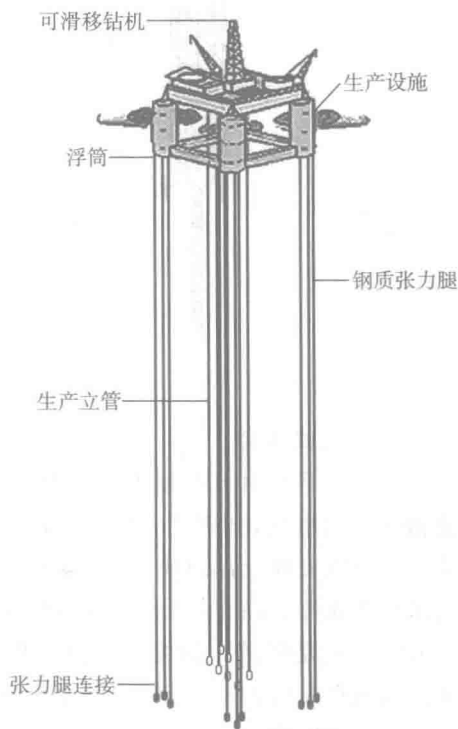


图 1-3 张力腿平台

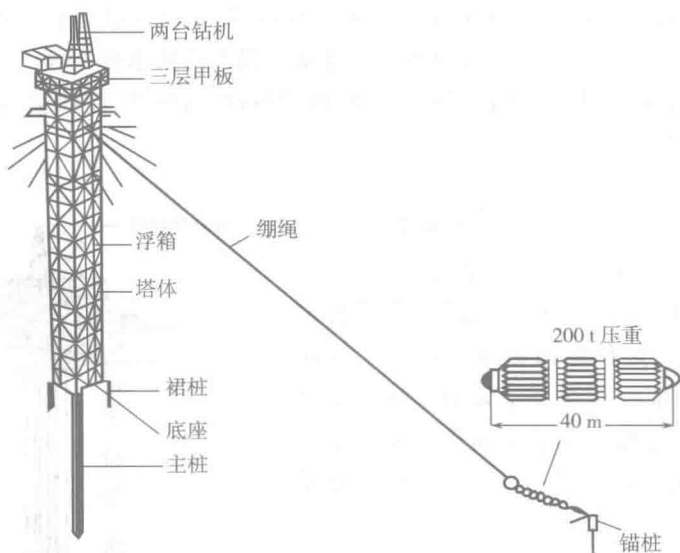


图 1-4 顺应塔式平台

5. 单柱式平台

单柱式平台由上部组块、筒式浮体、系泊缆、立管系统和桩基础组成,如图 1-5 所示。浮体的作用是保持足够的浮力以支撑上部组块、系泊缆和立管的重量,并通过底部压载使浮心高于平台重心,形成不倒翁的浮体性能。系泊缆一般是锚链+钢缆+锚链结构,其作用是把浮式平台锚泊在海底的桩基础上,使平台在环境作用下的运动在允许范围内。

单柱式平台的优点:

(1) 支持水上干式采油树,可直接进行井口作业,便于维修。

(2) 其升沉运动与张力腿平台相比要大,但相对半潜式平台和浮船式平台较小;对上部结构的敏感性较小;机动性较大,通过调节系泊系统可在一定范围内进行钻井,且重新定位比较容易。

(3) 对特别深的水域,其造价比张力腿平台有明显的优势。

单柱式平台的缺点:

(1) 井口立管和支撑的疲劳较严重;

(2) 浮体涡激振动较大,会引起各部分,如立管浮筒、立管和系泊缆的疲劳;

(3) 由于主体浮体较大,需要平躺制造,安装和运输使用的许多设备会同主体设备冲突。

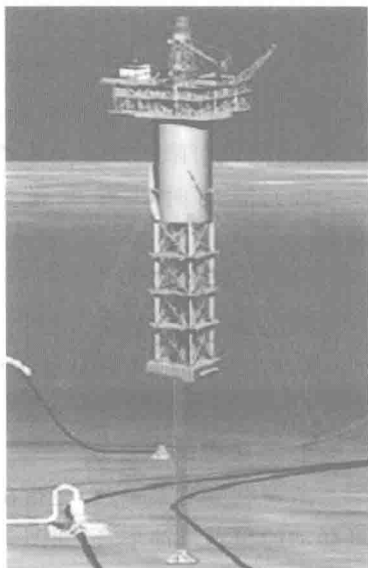


图 1-5 单柱式平台

二、移动式平台

凡用桩或锚或系泊系统或动力定位系统固定在一定的位置上并可移动的结构物称为移动式结构物或浮式结构物,例如自升式平台、坐底式平台、半潜式平台、FPSO等。移动式结构物按其支撑形式又可分为着底式结构物(如自升式平台、坐底式平台)和漂浮式结构物(如半潜式平台、FPSO)两类。

1. 自升式平台

自升式平台又称甲板升降式或桩腿式平台(见图1-6)。浮在水面的平台上装载钻井机械、动力、器材、居住设备以及若干可升降的桩腿。钻井时,桩腿着地,平台沿桩腿升高海面一定高度;移位时,平台降至水面,桩腿升起,平台就像驳船一样可由拖轮拖移到新的井位。

自升式平台的优点主要是所需钢材少、造价低,在各种海况下都能平稳地进行钻井作业;缺点是桩腿长度有限,使其工作水深受到限制(其最大工作水深约为120 m,超过此水深,桩腿重量增加很快),同时拖航时桩腿升得很高,对平台稳定性和桩腿强度都不利。

自升式平台有自航、助航和非自航之分,大多数为非自航;按平台形状可分为三角形平台(三根桩腿)、矩形平台(一般为四根桩腿)和五角形平台(五根桩腿)等。

2. 坐底式平台

坐底式平台通常由三部分组成:上体、支柱和下体,如图1-7所示。上体(亦称平台主体、平台甲板)为钻井所需的平台,下体(亦称沉垫)提供移动时所需的浮力,上体和下体之间则由若干支柱加以连接。当平台需钻井坐底时,在沉垫中打入压载水使之沉底,但此时

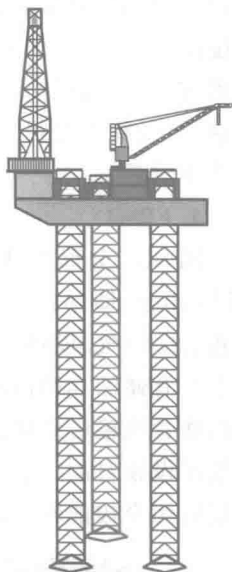


图 1-6 自升式平台

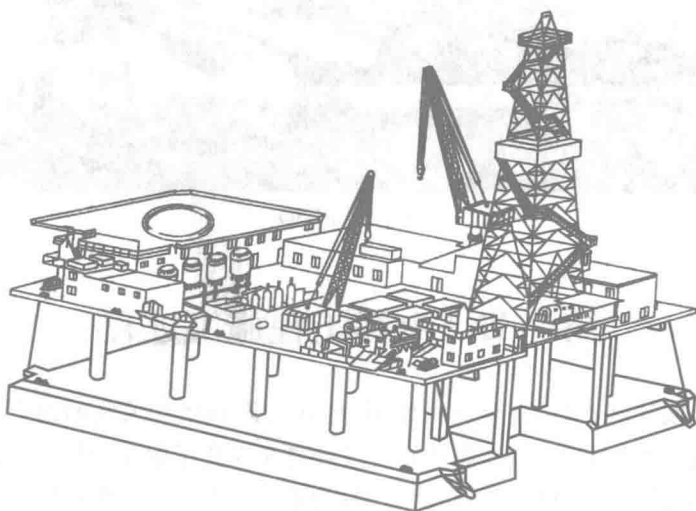


图 1-7 坐底式平台



上体仍需高出水面;钻井完毕后,排出压载水,使下体上浮,再进行移位。

3. 半潜式平台

半潜式平台上部为工作甲板,下部为两个下船体,用支撑立柱连接,如图 1-8 所示。工作时,下船体潜入水中,甲板处于水上安全高度,水线面积小,波浪影响小,稳定性好、自持力强,其工作水深大,新发展的动力定位技术用于半潜式平台后,其工作水深可达 3 000 m。半潜式平台与自升式平台相比,其优点是工作水深大,移动灵活;缺点是投资大,维持费用高,需有一套复杂的水下器具。

4. FPSO

FPSO(全称为 Floating Production Storage and Offloading)即浮式生产储油卸油装置,它将生产分离设备、注水(气)设备、公用设备以及生活设施等安装在一艘具有储油和卸油功能的油轮上(见图 1-9),油气通过海底管线输送到单点后,经单点上的油气通道通过软管输送到 FPSO 上,FPSO 上的油气处理设施对油、气、水进行分离处理,分离出的合格原油储存在 FPSO 上的油舱内,计量标定后用穿梭油轮运走。

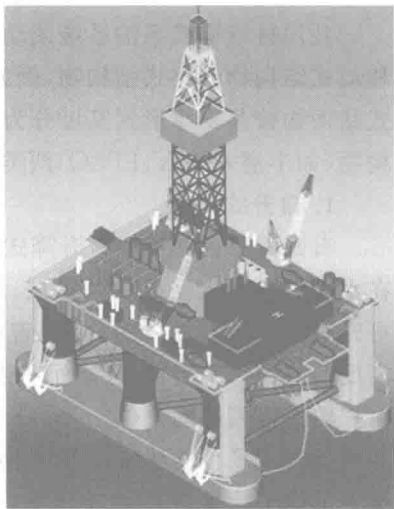


图 1-8 半潜式平台



图 1-9 FPSO

第三节 海洋工程施工过程

海洋平台从设计到制造,直至交付使用,包含着许多相互关联的因素,需进行综合考虑和处理。就施工工作者而言,在海洋平台设计之初就要了解平台使用标准、环境标准等基本情况,从而对设计者提出工艺性要求,对结构工艺提出建设性意见,以便日后建造时便于施工。为此,应了解整个海洋工程施工工程。

一、准备阶段

- (1) 使用标准确定、确认；
- (2) 环境标准确定；
- (3) 可行性研究和价格估计；
- (4) 财力安排及货币分配。

二、设计阶段

1. 初步研究及专门调查

- (1) 海底土壤；
- (2) 浮吊和运输驳船的规格选择；
- (3) 有关腐蚀、冰、地震情况，产品及人员运送情况。

2. 工程图纸的设计及准备

- (1) 基础设计；
- (2) 结构设计；
- (3) 图纸准备。

3. 文件准备

- (1) 技术要求书；
- (2) 合同文件；
- (3) 投标书；
- (4) 浮吊和运输驳船的租借合同；
- (5) 拖船和工作船的租借合同。

三、投标阶段

- (1) 投标者的选择；
- (2) 投标书的接送；
- (3) 投标的评定；
- (4) 合同的签订。

四、建造阶段

1. 建造设计

建造方案及分段(分片)划分的确定及必要的计算文件、施工要领。

2. 陆地预制

- (1) 订购和接收材料；
- (2) 专门项目的制造；
- (3) 放样、排料，各种样板和模型制作，以及各种部件加工；
- (4) 焊工资格确认；



- (5) 部件装焊；
- (6) 部件、构件组件组装成组合体或分段；
- (7) 组合体(或分段)涂装、防腐保护；
- (8) 陆地合拢。

3. 装载运输至海区及下水

采用运输驳船将平台运输至安装海区,并下放至水中。

4. 海上安装

- (1) 水下部分就位；
- (2) 桩基固定；
- (3) 水上部分及设备安装；
- (4) 其他有关构筑物安装。

5. 试验,验收,交业主使用

对平台进行测试,经验收合格后交付业主使用。

思考题

- 1. 根据各平台特点,试分析我国南海油气开发宜采用何种平台形式。
- 2. 为降低单柱式平台的涡激振动,可采取何种工程措施?
- 3. 顶端张紧式立管和钢悬链线立管有何特点?

第二章 海洋平台用钢及其加工工艺

第一节 海洋平台用钢

海洋平台是在海洋上进行作业的特殊场所,主要用于海上油气的钻探和开发,其中钻探设施主要包括自升式平台和半潜式平台,开采设施主要包括固定式导管架平台、顺应塔式平台、张力腿平台、单柱式平台及浮式生产储油卸油装置等。海洋上特殊的环境对钢材提出了苛刻的要求,使其制造成本和售价都远远高于普通钢材。海洋平台服役期比船舶类高 50%,因此它所采用的钢板必须具有高强度、高韧性、抗疲劳、抗层状撕裂、良好的焊接性和耐海水腐蚀等特点。

一、海洋平台用钢要求

海洋平台用钢是在船体用钢的基础上发展起来的,最初建造的钢质平台都是用船体结构钢。为了满足日益增长的海洋石油需求,石油开发逐渐由浅海向深海发展,由温暖海域向低温寒冷海域发展,因此海洋平台要经受各种气候条件和风浪的袭击,经受海水的腐蚀,其工作环境条件非常苛刻。另外,结构的大型化趋势也很显著,结构复杂,焊接工作量大,节点焊接本来就困难,加之节点处的应力集中比较高,使结构处于更危险的状态。因此,为了确保海洋平台能够安全、可靠地工作,对所用的钢材提出了更高的要求。

1. 强度

材料的强度一般采用光滑试件单向拉伸实验进行确定。金属材料在单向应力、双向应力和三向应力条件下会得出机械性能差别很大的实验结果,其中单向应力条件下测得的材料屈服强度比三向应力条件下可提高 1.68 倍甚至更高。所谓光滑试件,实际上是相对于缺口或裂纹试件而言的。光滑试件可保证材料承受单向拉应力,而缺口或裂纹试件必然导致受试部位处于双向或三向受力状态。一般所用的试件为圆柱和板状,就是为了使金属材料承受单向应力。

拉伸实验的示意图如图 2-1 所示。

光滑拉伸试件由三部分组成:一是工作部分,图 2-1 中的 L_0 就是拉伸试件的工作部分,它在原材料或部件中的取向、部位及自身形状,各种精度、光洁度及加工程序等在标准中都有详细的规定。二是过渡部分,图 2-1 中的 R 部位就是工作部分向外过渡的部分,这