

Fracture Theoretical Research on
Deep-Water Semi-submersible Platform's Horizontal Brace

深水半潜式平台 横撑断裂理论研究

梁 政 王 飞 著



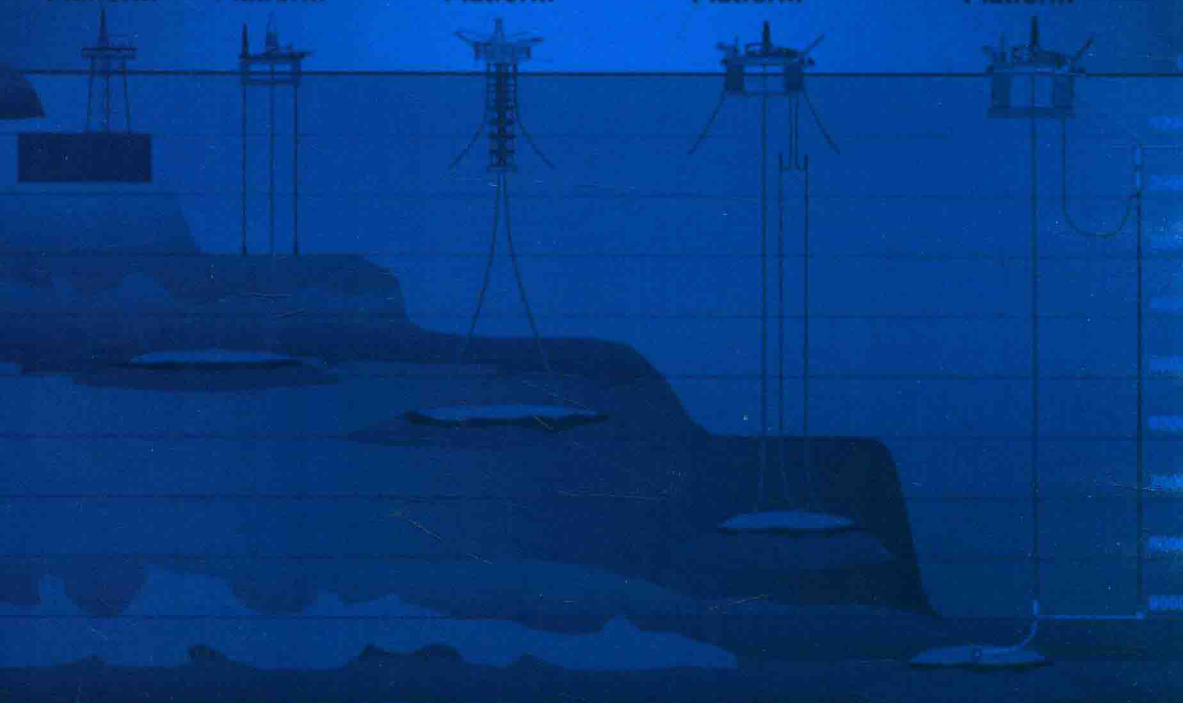
Fixed
Platform

Tension Leg
Platform

Spar
Platform

Semisubmersible
Platform

Semisubmersible
Platform



科学出版社

深水半潜式平台横撑断裂理论研究

梁 政 王 飞 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在对海洋环境载荷分析的基础上,以惯性矩等效和重量等效为依据,建立深水半潜式平台载荷与横撑载荷分析简化模型,得出深水半潜式平台横撑承载特点。在分析深水半潜式平台横撑承载特征、裂纹易发部位及裂纹类型的基础上,建立横撑断裂解析模型,导出横撑裂纹特征参数解析解,并利用 CTODc 和 CTOAc 作为裂纹起裂和扩展控制参数,求得考虑裂纹扩展的横撑承载极限。

本书可供从事深水半潜式平台设计与制造的研究人员参考,其分析研究方法可供从事深水半潜式平台载荷计算及横撑构件断裂失效分析的相关研究人员借鉴,亦可作为大专院校研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

深水半潜式平台横撑断裂理论研究/梁政,王飞著. —北京:科学出版社, 2016.2

ISBN 978-7-03-047293-9

I. ①深… II. ①梁… ②王… III. ①海上平台-断裂-研究
IV. ①TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 021096 号

责任编辑:杨 岭 罗 莉/责任校对:陈 靖 刘 勇
责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:196 560

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着油气资源需求的增加和陆地与浅水油气资源可采储量的降低,海底油气资源的开采向深水甚至超深水水域发展。随着水深的增加,传统的固定式与自升式海洋钻采平台由于自身重量和成本的大幅度增加已不能适应深水油气勘探开发的需求。

相比张力腿平台、Spar 等同样适用于深水的油气钻采平台,半潜式平台具有投资小、有更大的甲板空间和可变载荷、作业范围较广且无须海上安装等优点,半潜式平台已成为满足深水作业更佳的选择,各大石油公司和相关研究机构均投入了大量的资源进行新一代半潜式平台的研发与应用。

由于深水油气装备的高风险性,平台结构的安全性成为设计者考虑的首要问题。历次海洋平台严重事故统计表明,平台薄弱结构的断裂失效破坏是平台整体失效的主要因素之一。基于深水半潜式平台结构特点以及遭受到的复杂载荷,半潜式平台水平横撑成为平台最薄弱的结构之一。为快速、合理、准确地评价半潜式平台水平横撑结构存在裂纹损伤情况下的断裂特征及承载能力,科学制定平台使用、维修方案,对横撑裂纹进行有效控制以保证平台结构安全,系统开展含裂纹横撑的断裂力学性能研究具有重要意义。

本书是第一部系统研究深水半潜式平台横撑断裂理论方面的专著,依托国家 863 重大项目,针对深水半潜式平台在复杂海洋环境载荷作用下横撑构件承受的载荷情况以及横撑断裂理论进行了系统分析研究。本书的出版将填补深水半潜式平台关键结构断裂理论研究著作方面的空白。

本书在对新一代深水半潜式平台主要性能分析的基础上,以惯性矩等效和重量等效为依据建立计算模型,采用长期预报设计波法计算适合我国深水海域作业要求的深水半潜式平台承受的随机波浪载荷,并与深水水池模型试验测试数据对比,验证了模拟方法与计算结果的准确性,得出了深水半潜式平台横撑构件在海洋随机载荷下承受的载荷特征。

在对横撑裂纹特征及承受载荷分析的基础之上,利用半膜力理论和塑性模型建立了横撑与立柱连接部位的分析计算模型,导出水平横撑在拉伸与弯曲载荷作用下周向穿透裂纹的弹塑性解,得到裂纹截面弹塑性区域控制参数和裂纹尖端张开位移等横撑断裂特征参数的解析结果。并分别采用裂纹尖端张开位移和裂纹尖端张开角作为裂纹开裂和裂纹稳定扩展的控制参数,推导出横撑在外载荷作用下裂纹扩展的弹塑性解析结果。根据横撑裂纹扩展模型得到含周向穿透裂纹水平横

撑在拉弯载荷作用下的极限承载能力的解析方法,分析了不同结构参数及材料性能参数对含裂纹横撑极限承载能力的影响。

本书第1章简要介绍了深水半潜式平台的特点、发展现状以及半潜式平台横撑断裂国内外研究概况,提出了研究深水半潜式平台横撑断裂理论的必要性。第2章介绍了深水半潜式平台承受的环境载荷及随机波浪统计分析理论。第3章对典型结构形式深水半潜式平台总体性能进行了分析,以惯性矩等效和重量等效为依据对半潜式平台进行简化建模,将简化模型在环境载荷作用下的运动响应与水池试验测试结果进行对比分析,验证了简化建模方法的可行性,并对深水半潜式平台典型载荷进行长期预报,得出海洋环境载荷作用下深水半潜式平台横撑承受的载荷特征。第4章通过对半潜式平台横撑断裂特征以及横撑承载特征进行综合分析,利用半膜力理论和裂纹截面塑性模型对横撑容易出现裂纹的部位建立数学模型,导出横撑在外载作用下裂纹截面的弹塑性解,并得到横撑裂纹截面特征参数的解析结果。第5章分别采用CTOD_c和CTOAc为作为裂纹开裂和裂纹稳定扩展的控制参数,导出横撑在外载作用下裂纹扩展的弹塑性解析解,并得出含裂纹横撑承载极限的解析方法,最后分析了不同结构参数及材料性能参数对含裂纹横撑极限承载能力的影响。

由于作者学识和相关验证试验条件的限制,理论研究结果还需进一步在应用实践中对比验证。对书中错误及不完善的地方,恳请读者批评指正,以推动海洋深水半潜式平台关键结构断裂理论研究及应用技术方面的发展。

本书的研究工作得到国家高技术研究发展计划(863计划)“深水钻机与钻柱自动化处理关键技术研究”(课题编号:2012AA09A203)的资助。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 海洋油气资源开发现状	1
1.1.2 海工装备发展现状	2
1.2 半潜式平台的特点和发展现状	4
1.2.1 主要深水油气钻采平台	4
1.2.2 半潜式平台的发展	6
1.2.3 半潜式平台破坏事故	9
1.3 半潜式平台横撑断裂研究进展	13
1.4 本书主要研究工作	15
第 2 章 环境载荷及水动力分析基本理论	16
2.1 平台运动坐标系	16
2.2 海洋环境载荷分析	17
2.2.1 波浪载荷	17
2.2.2 风载荷	22
2.2.3 流载荷	28
2.2.4 其他载荷	30
2.3 随机波浪统计分析	30
2.3.1 不规则波	30
2.3.2 波浪谱	31
2.3.3 短期海况与波浪散布图	35
2.3.4 线性系统的响应关系	35
2.4 设计波法	36
2.4.1 确定性设计波法	36
2.4.2 随机性设计波法	37
2.4.3 长期预报设计波法	38
第 3 章 深水半潜式平台横撑载荷分析	40
3.1 深水半潜式平台结构分析	40

3.1.1	深水半潜式平台结构形式	41
3.1.2	典型结构形式性能分析	47
3.2	半潜式平台简化模型的建立	56
3.2.1	简化模型建立依据	56
3.2.2	半潜式平台简化模型	56
3.3	半潜式平台运动响应分析	63
3.3.1	平台附加质量和阻尼系数	64
3.3.2	运动响应幅值算子	65
3.3.3	运动响应谱	67
3.4	典型载荷预报	69
3.4.1	典型载荷选择	69
3.4.2	典型载荷传递函数	75
3.4.3	半潜式平台载荷预报	79
3.5	横撑承载分析	82
3.5.1	横撑应力响应特征	82
3.5.2	横撑承载分析	87
第4章	半潜式平台横撑断裂分析	89
4.1	横撑断裂特征	89
4.1.1	横撑裂纹易发部位	89
4.1.2	载荷分析	91
4.1.3	横撑裂纹类型	91
4.2	含裂纹横撑断裂分析	92
4.2.1	断裂解析模型	92
4.2.2	断裂模型控制方程	94
4.2.3	横撑断裂模型边界条件	96
4.2.4	模型求解	103
4.3	算例与分析	108
4.3.1	拉伸载荷下横撑的断裂分析	108
4.3.2	弯曲载荷下横撑的断裂分析	110
4.3.3	拉弯组合载荷下横撑的断裂分析	112
第5章	基于横撑断裂的承载极限分析	119
5.1	横撑断裂控制方程	119

5.1.1 裂纹起裂控制方程	119
5.1.2 裂纹扩展控制方程	120
5.2 基于裂纹扩展横撑承载极限分析	121
5.2.1 无塑性压应力扩展	121
5.2.2 有塑性压应力扩展	123
5.2.3 承载极限分析	127
5.3 横撑承载极限实验分析	130
5.4 算例与分析	131
5.4.1 裂纹界面不同约束承载对比	131
5.4.2 拉弯载荷作用下横撑承载极限分析	133
5.4.3 横撑承载极限影响因素分析	134
参考文献	144

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 海洋油气资源开发现状

随着世界经济的不断发展,人类社会对油气资源的需求不断上升。《BP 世界能源统计年鉴 2015》统计报告^[1]表明石油天然气仍然是世界主要能源,2011 年全球石油消费增长 0.8%,占全球能源消费的 33.1%;天然气消费增长 2.2%,约占全球能源消费的 23.7%。根据《世界能源展望 2015》预测^[2],到 2035 年亚洲的能源进口依存度将升至 27%,其中石油增长比重占 60%,进口量占亚洲石油消费的 80%以上,即亚洲石油进口量几乎相当于石油输出国组织(OPEC)目前的石油总产量,油气供给增长速度远远不能满足油气消费增长速度。

辽阔的海洋蕴藏着丰富的资源,其中油气资源的开发是海洋资源开发的重要组成部分。目前已探明的海洋石油储量 80%以上在海洋深水区域,大量的海域油气资源还有待勘探。随着世界油气需求的增加,陆上及近海常规水深的开发已趋饱和,海底油气的开采逐渐向深水域和超深水域发展。

为满足日益增长的能源需求,世界先进国家都将油气资源开发的重点投向了深海,海洋深水区将成为重要的油气新增量来源。近 10 年来全球发现的大型油气田中,海洋占 60%以上,而其中 70%在深水。预计到 2020 年海上石油产量占比将会提升到 34%,其中深海占比 13%。截至目前,墨西哥湾、巴西等深水区域油气产量已经超过浅水海域。

我国对外能源依赖度日益增加,能源安全形势严峻,随着经济的快速发展,对能源的需求也迅速增长,已成为仅次于美国的世界第二大石油消费国。预计到 2035 年我国油气消费将达到 1800 万桶/日,超过美国的需求;不断提高的能源对外依存度正成为我国能源安全一个不可忽视的重要问题。

我国海上原油产量从 2006 年 2951 万吨增长到 2014 年的 6868 万吨,增量达 3917 万吨,占全国总新增产量的 60%左右,表明海上石油已成为我国石油产量新增量的主要来源。我国海洋权属区油气资源蕴藏丰富,尤其南海是世界公认的“三湾、两湖、两海”大油气区之一,预测石油储量为 $230 \times 10^9 \sim 300 \times 10^9 \text{ t}$,天然气 $16 \times 10^{13} \text{ m}^3$,占我国油气总资源量的三分之一左右,其中 70%蕴藏于深海区域。

1.1.2 海工装备发展现状

深水油气资源开发，设备先行，促进了深水油气资源开发重大装备的迅速发展。随着新技术、新材料的不断开发应用，勘探开发成本逐年减低，油田建设周期也不断缩短，使得项目的经济效益显著提高，进一步促进了深海石油开发的发展。

目前全球主要海洋工程装备建造商集中在新加坡、韩国、美国及欧洲等国家和地区；钻井设备和采油设备的生产商大多数都是日本、韩国、新加坡的船企；设备设计商主要是美国、挪威、荷兰的一些企业；承包商主要是美国^[1, 2]的相关企业。目前世界海洋工程装备产业总体竞争格局如图 1-1 和图 1-2 所示。

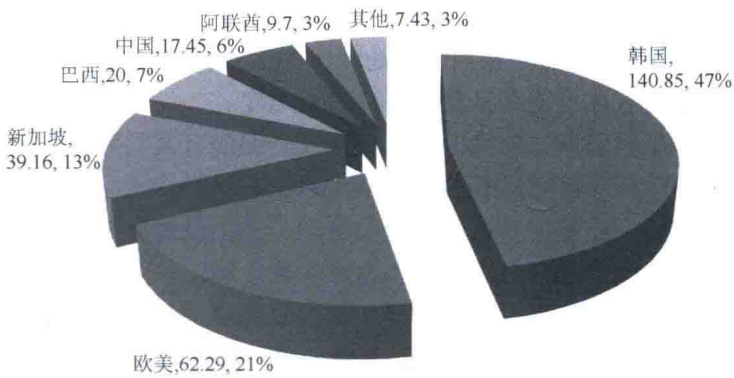


图 1-1 世界海工装备主要生产国家（单位：亿美元）

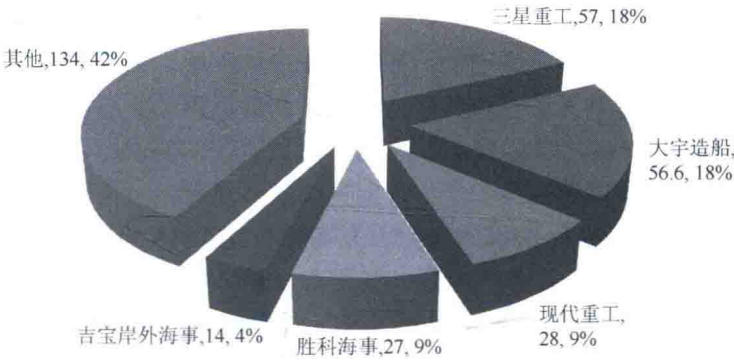


图 1-2 世界海工装备主要生产企业（单位：亿美元）

受之前我国自身装备技术所限，虽然我国对水深小于 300m 的浅海油气田的

开发技术已处于世界先进水平，目前在南海北部 $20 \times 10^4 \text{km}^2$ 内开展工作，生产油气 2000 万吨油当量^[3,4]，但在大于 300m 的深水、超深水领域尚处于起步阶段。特别是南海海域自然环境恶劣，开发技术难度大、成本高以及多处于争议地区，南海深水区的油气开发还处于空白。

随着经济的发展，我国对南海领海主权重视程度日益提高，近年来国家出台了一系列海工装备支持政策，如表 1-1 所示。

表 1-1 我国近期海工装备支持政策

时间	政策规划	主要内容
2009.6	《船舶工业调整和振兴规划（2009—2011）》	规划到 2011 年海洋工程装备市场占有率达到 10%，若若干个专业化海洋工程装备制造基地初具规模，海洋工程装备开发取得突破。加大技术改造力度，加强关键技术和新产品的研究开发，提高船用配套设备水平，发展海洋工程装备，培育新的经济增长点，为建设造船强国和实施海洋战略奠定坚实基础
2011.3	《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》	明确指出，面向海洋资源，大力发展海洋工程装备
2012.3	《海洋工程装备制造业中长期发展规划》	重点打造环渤海地区、长三角地区、珠三角地区三个产业集聚区，培育 5~6 个具有国际影响力的海工装备总承包商和一批专业化分包商。2015 年，年销售收入达到 2000 亿元以上，工业增加值率较“十一五”末提高 3 个百分点，其中海洋油气开发装备国际市场份额达到 20%；2020 年，年销售收入达到 4000 亿元以上，工业增加值率再提高 3 个百分点，其中海洋油气开发装备国际市场份额达到 35%以上
2012.5	《高端装备制造业“十二五”发展规划》	面向国内外海洋资源开发的重大需求，以提高国际竞争力为核心，重点突破 3000m 深水装备的关键技术，大力发展以海洋油气为代表的海洋矿产资源开发装备
2012.8	《海洋工程装备产业创新发展战略（2011—2020）》	为增强海洋工程装备产业的创新能力和国际竞争力，推动海洋资源开发和海洋工程装备产业创新、持续、协调发展指明了方向
2012.8	《海洋工程装备科研项目指南（2012 年）》	围绕海洋资源勘探、开采、储运和服务四大环节形成了 18 个 2012 年海洋工程装备研发的重点方向。在海洋资源勘探、开采、作业装备领域，明确了深海半潜式生产平台总体设计关键技术研究、LNG-FPSO 总体设计关键技术研究、深海半潜式支持平台研发、LNG-FSRU 总体设计关键技术研究、海上油田环保作业船研发等 5 个研发重点方向

近几年，中国海洋石油总公司公开招标的中国海域区域基本上都位于南海，特别是 2011 年开始出现了深海海域的区域招标，加上“十一五”期间投入 150 亿元打造的包括“海洋石油 981”超深水钻井平台、“海洋石油 708”深水工程勘探船、“海洋石油 201”3000m 级深水铺管起重船、“海洋石油 720”十二缆深水物探船等的“深水舰队”陆续投入作业（如图 1-3 所示），表明我国向深海石油开发已迈出了实质性的一步。



海洋石油981



海洋石油708



海洋石油201



海洋石油720

图 1-3 海洋石油代表性“深水舰队”

可以预见,我国深海油气开发技术及配套海工装备将会得到极大的发展,同时深海油气资源开发必将成为未来我国海洋石油开发的主战场,这对保证我国经济的可持续发展具有重要的战略意义。

1.2 半潜式平台的特点和发展现状

1.2.1 主要深水油气钻采平台

1887年, H. L. Williams 在加利福尼亚州圣巴巴拉海岸完成了第一口井,从而拉开了人类开发海洋石油的序幕,至今已有一个多世纪。在海洋资源勘探开发的进程中,各国已研制了多种多样的海洋油气装备,如图 1-4 所示。

随着海洋石油钻采水深的增加,传统的导管架和重力式等平台由于自重和成本的大幅度增大而不适合深水开发,适合于深海作业的钻采生产系统成为研究的热点。近几十年来,由于墨西哥湾、巴西、西非、北海等深水油气的不断开发,涌现出多种适合于深海油气钻采生产的平台形式:张力腿平台、Spar、半潜式平台等,如图 1-5 所示。

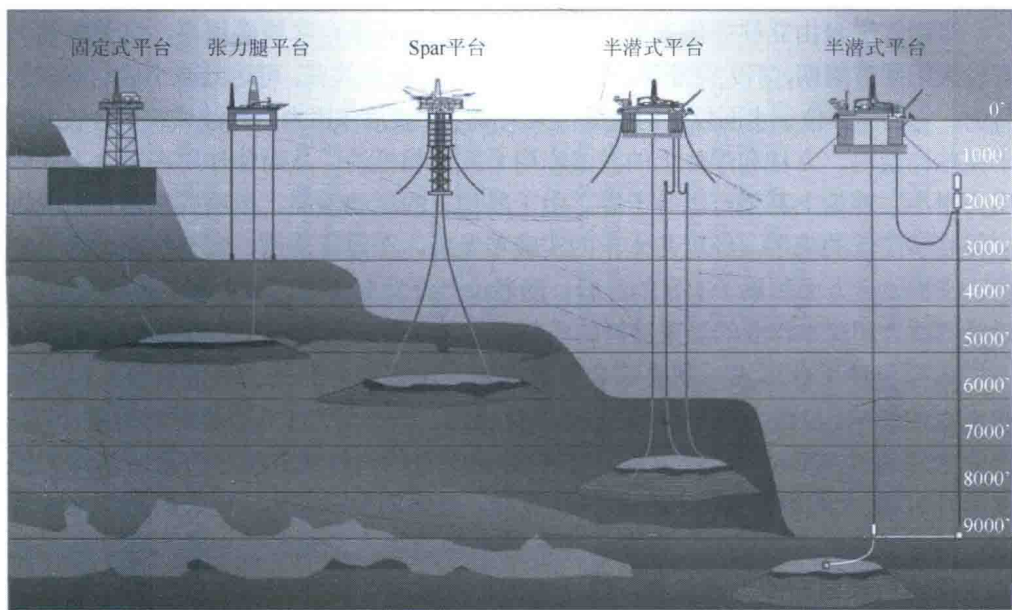


图 1-4 海洋油气钻采平台类型

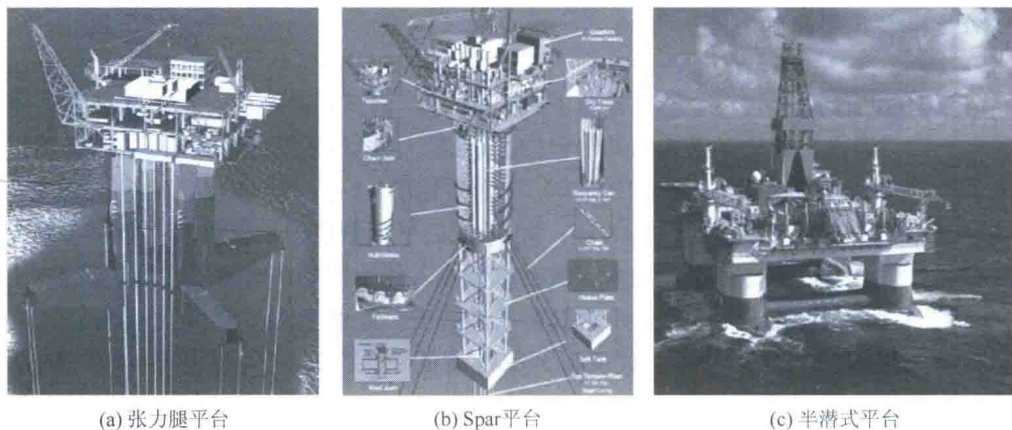


图 1-5 张力腿平台、Spar 平台、半潜式平台

张力腿平台依据船体的浮力使张力腿始终处于伸张状态，由于张力腿的刚性作用使平台位移很小，特别是偏移和触底很小。但由于张力腿平台可变载荷小，在水深增大时，张力筋腱重量的增加将限制平台的大小，使其成本急剧增大。

Spar 平台具有较大的可变载荷，可将立管等钻井设备布置在壳体内部，能够形成有效的保护作用。但由于需要大型海上吊装船在平台现场安装上部模块，费用较高，不适用于边际油田的开采。Spar 平台的设计和制造领域都具有很强的垄断性，目前具有 Spar 平台设计制造能力的公司大多在美国。

半潜式平台由立柱提供工作所需的稳性。半潜式平台水线面很小,这使得它具有较大的固有周期,不大可能和波谱的主要成分波发生共振,可达到减小运动响应的目的;它的浮体位于水面以下的深处,大大减小了波浪作用力,当波长和平台长度处于某些比值时,立柱和浮体上的波浪作用力能互相抵消,从而使作用在平台上的作用力很小,理论上甚至可以等于零。由于其优良的运动性能,半潜式平台自出现以来得到了广泛的应用,经过几十年的实践和发展,在设计建造、安全作业、海上定位、维护改造方面积累了丰富的经验,随着油气开发向深海进军、水下技术的进步,以及更适合超深水作业的湿采油树的成熟应用,半潜式平台进入了新的发展期。

选择何种平台形式,需要综合考虑成本、工作能力和安全性的要求,以及作业水域的影响。与张力腿平台和 Spar 平台相比,半潜式平台具有相对总投资小(在作业水深超过 800m 后,张力腿平台和 Spar 平台的投资成本随平台适应水深大幅度提升),更大的甲板空间和甲板可变载荷,更强的生产能力,更大的工作水深范围,易于改造并具备钻井、修井、生产等多种功能,无须海上安装,全球全天候的工作能力和自存能力等优点。综合考虑投资成本、工作水深范围、井口数目、服务年限和工作地域等因素,半潜式平台将是更佳的选择。

1.2.2 半潜式平台的发展

在 20 世纪 60 年代,全球共建造了大约 30 座半潜式钻井平台,目前这部分平台基本上都已退役。随后半潜式钻井平台的数量经历了两次跳跃式的发展,70 年代建造了 74 座,主要集中在 1975~1977 年,3 年共建了 41 座;80 年代共建造了 76 座,其中仅 1982~1984 年就新建了 48 座;90 年代后平台数量增长缓慢,主要原因是当时对部分即将退役的平台实施技术改造后重新投入使用市场,缓解了市场的需求。

进入 21 世纪后,随着石油天然气需求的提升,作业者大规模开发深海油气的愿望更为强烈,引发了对新一代深海开采装置的更大需求,从而使得半潜式钻井平台的数量出现了新的增长点。

可以预见,在今后 5~10 年,这种增长趋势不会减弱。世界上半潜式平台的投入资金已经和 20 年前的黄金时代基本持平;半潜式平台朝着深海、高科技含量、高附加值的方向发展,进入了新的发展阶段,正处于深海半潜式平台研究和制造的又一个黄金时代^[3,4]。另外,从半潜式平台的利用率来看,最近几年一直维持在比较高的水平,特别是自 2011 年以来,平台的使用率在 80%以上,最高时期达 92.5%,这也从另一个角度反映了市场对半潜式平台的极大需求。

从第一座半潜式钻井平台的诞生至今近半个世纪的时间里,半潜式钻井平台的发展经历了多次技术改造和革新。半潜式钻井平台发展历程及各阶段技术特点如表 1-2 所示。

表 1-2 半潜式平台代际划分及技术特点

代际	设计者	典型平台 (数量)	作业水深/m	定位方式	钻井深度/m	大钩载荷/t	特点
一	ODECO ODECO SEDCO	Ocean Driller (2) Ocean Queen (5) SEDCO 135 (12)	100~200	锚泊	—	—	浮体一般为水平圆柱体, 多为桁架结构, 撑杆和横撑较多, 形状多样
二	Forex Neptune & IFP ODECO SEDCO Aker Fride & Goldman Korkut Engineers	Pentagone (11) Ocean Victory (11) SEDCO 700 (11) Aker H-3 (37) L-900 Pacesetter (5) New Era (6)	200~600	锚泊	约 7500	—	结构比较复杂, 设备操作自动化程度低, 这一代的平台很多被升级为第四、五代平台。
三	ODECO Aker Fride & Goldman	Odyssey (5) Aker H4.2 (2) Enhanced Pacesetter (33)	450~1500	锚泊	7500~9000	约 450	新增两个下浮体, 横撑连接, 上部结构比较复杂, 在作业水深方面有很大的改进, 这一代平台大多数为新建平台
四	Diamond Offshore Atwood Oceanic Noble Drilling	Ocean Victory Upgrade (3) New Era Upgrade (3) EVA-4000 Conversion (4)	1000~1500	锚泊+动力定位, 锚泊为主	7500~9700	约 585	多为老龄化平台升级而来, 升级后在大钩载荷、设备容量和系泊能力方面大有改观。多采用扩展性系泊, 一些还辅助有动力定位
五	Transocean Noble Drilling Smedvig Diamond Offshore Ocean Rig ASA SEDCO Forex	R&B Falcon (2) EVA-4000 Conversion (1) Smedvig ME 5000 (1) Ocean Victory Upgrade (2) Bingo 9000 (2) Express Class (3)	1500~3048	锚泊+动力定位, 动力定位为主	9000~11250	约 720	自动化钻井控制系统, 良好的船体安全性和抗风浪能力, 能适应更加恶劣的海洋环境。采用高强度钢和优良的设计, 可变载荷和甲板空间增大, 外形结构简单
六	GVA Consultant Moss Maritime Aker Frigstad	Seadrill (4) West E-drill (2) Aker H6e (2) Frigstad Oslo (3)	3048~	锚泊+动力定位, 动力定位为主	9000~12000	约 900	采用多功能设计, 大量应用高强度轻质材料, 结构更加紧凑、人员数量减少、造价昂贵。适用于超深水海域

目前,第五、六代半潜式平台大都具有在水深 1500m 以上水域工作的能力,配备甲板大吊机,采用动力定位系统,结构设计条件高,抗风暴能力强。在结构形式上,新一代的半潜式平台趋于大型化和简单化。平台的主尺度增大,立柱浮体和主甲板间的内部空间增大,物资(水泥、黏土粉、重晶石粉、钻井泥浆、钻井水、饮用水和燃油等)存储能力增强。平台外形结构趋于简化,下浮体趋向采用简单的方形截面,平台甲板也为规则的箱形结构;采用少节点的简单外形结构,立柱和撑杆、节点形式简化、数目减少,这些改变都大大降低了节点疲劳破坏风险及建造费用。

我国海洋工程开发事业起步较晚,在半潜式平台的应用和开发领域与国外相比明显滞后。直到 1984 年,才出现了第一座自主研发建造的半潜式钻井平台“勘探三号”,并成功地用于东海油气田的勘探开发,达到了当时国际同类型半潜式钻井平台的水平;但在随后相当长的一段时间里,半潜式平台的研制工作一直处于停顿状态。近年来,随着人们海洋意识的不断提高,国家对海洋工程领域投资逐年增加,一些国内船厂和设计单位开始涉猎半潜式平台领域,并取得了令人瞩目的成果。

1999 年,大连造船新厂在国内率先进入半潜式平台制造领域,先后建成了 4 座 BinGo9000 系列第五代半潜式平台,并于 2006 年 6 月,启动了国内首座作业水深 3050m 的半潜自定位式深海浮动钻井平台建造项目;2000 年,上海中港装备工程有限公司完成了新一代半潜式转载平台的总包建造;2006 年 4 月,烟台莱福士船业有限公司顺利完成了“布里斯托利号”半潜式生活平台的改装,并承接了 Frigstadiscoverer 公司的第 6 代超深水半潜式钻井平台 Frigstad0510 号的建造工作;2006 年 7 月中远船务舟山分公司完成了对“勘探三号”的维修改造;上海船厂也在崇明建造了大型船坞,为建造第六代半潜式平台做准备。

在研究开发领域,大连理工大学与大连造船新厂合作,于 2001 年完成了 BinGo9000 型半潜式钻井平台主体结构优化设计研究;中国船舶工业集团公司第七〇八所与上海外高桥造船有限公司共同承担并完成了第六代智能型深海钻井平台“海洋石油 981”的设计与建造,其最大钻井深度达 9000m,最大工作水深达 3000m,可变载荷达 10000t 以上,适用于全球海域,可承受百年一遇的恶劣海况,并配备了大功率的主动力系统和高精度的 DP-3 动力定位系统,具有平台钻井、修井、采油及生产处理等多种功能。该平台具有国际领先水平,为我国设计及建造深、远海油气平台奠定了良好的技术基础。目前,中国船级社(CCS)也开始着手对海洋平台领域的开发研究工作,准备制定详细的海洋平台设计建造规范。

总的看来,我国深海平台技术的研究尚处于初步阶段,与世界先进水平相比有一定差距,这与最近几年国际深海平台创新概念与技术飞速发展的局面形成巨大反差,成为与国外海洋工程技术水平的主要差距之一。意识到这种不利局面以及海洋工程向深海发展的必然趋势,国内海洋工程界也掀起了对深海领域问题研

究的热潮，在世界各国对人类共同拥有的深海资源激烈竞争的形势下，促进我国海洋工程的科技进步，振兴我国民族工业，增强国际竞争力。由于深海平台是高技术、高性能、高附加值的装备，其自主研究开发必将推动高新技术的发展，带来巨大的经济效益和社会效益。

为适应水深 3000~6000m（占海洋总面积 73.83%）海域的油气开发，研发深水海洋石油钻井采油装备，已成为国际竞争的重要一环，也是今后较长时间的必然发展趋势。

1.2.3 半潜式平台破坏事故

由于半潜式平台具有移动性能良好、工作水深范围大、抗风浪能力强、甲板空间大、储存能力强及可变载荷高等明显优势，已成为海洋油气开发的主要平台。但半潜式平台作业时一直漂浮于水面，只是依靠锚泊设备或动力定位系统保持在一定的移动范围内，始终处于运动状态之中，结构受力十分复杂，平台一旦发生事故后果不堪设想。

基于对巨大的经济投入、海上作业人员安全及平台破坏可能带来巨大环境灾害等因素的考虑，深水半潜式平台的可靠性要求极高，几乎不容有失。尽管如此，在世界石油工业史上还是发生了许多由海洋平台失效而带来的巨大灾难，并造成了重大的损失和不良社会影响^[5,6]，其中比较典型的事故如表 1-3 所示。

表 1-3 海洋石油开发史上较为严重的平台事故

事发时间	事发海域	事发平台	事故原因及后果
1965.12.27	欧洲北海	Sea Gem	平台支柱连接处开裂，平台倾覆沉没，13 人罹难
1966.01.12	西太平洋	Sedco	水平撑杆与桩腿结合部位断裂，整个平台沉没
1979.11.25	中国渤海湾	渤海二号平台	拖航时没有打捞落在沉垫舱上的潜水泵，72 人罹难
1980.03.27	欧洲北海	Alexander Keilland	撑杆断裂，导致平台破坏而倾覆沉没，123 人罹难
1982.01.14	加拿大纽芬兰岛	Sea Quest 半潜式平台	巨浪冲毁压载控制室，导致平台沉没，84 人罹难
1983.10.25	中国南海莺歌海海域	爪哇海号钻井平台	遭遇暴风袭击导致船体开裂，平台倾覆沉没，81 人罹难
1988.07.06	欧洲北海	Piper Alpha	天然气泄漏发生爆炸，平台倾覆沉没，167 人罹难，损失达 20 亿美元
2001.03.15	巴西坎普斯湾	P-36	平台主甲板下支柱内发生爆炸，平台完全沉没，约 150 万升原油入海，11 人罹难
2005.07.27	印度西岸外海	BHN 号	恶劣海况中两平台发生碰撞，平台全毁，22 人罹难
2010.04.20	美国墨西哥湾	Deep Horizon	平台发生爆炸引发大火，沉入墨西哥湾，超过 400 万桶原油流入墨西哥湾，11 人罹难
2011.12.18	俄罗斯鄂霍次克海域	科拉号钻井平台	暴风雪侵袭，船体裂缝破坏引起平台沉没，4 人罹难，49 人失踪