

自升式平台 在役性能评估

唐文献 张 建 ○ 著



科学出版社

自升式平台在役性能评估

唐文献 张 建 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以自升式平台为对象,系统阐述了环境载荷推算、拖航/就位工况下平台稳性研究、插/拔桩工况下桩土作用机制、站立工况下平台静态/动态响应特性、站立工况下平台桩腿管节点疲劳寿命评估和意外工况下平台的碰撞特性等在役性能评估方法。

本书既可供从事自升式平台设计、建造与使用的工程技术人员参考,也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

自升式平台在役性能评估/唐文献,张建著. —北京:科学出版社, 2015.8

ISBN 978-7-03-045547-5

I. ①自… II. ①唐… ②张… III. ①自升式平台-操纵性能-技术评估 IV. ①TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 203009 号

责任编辑:邓静 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 8 月第一次印刷 印张:12

字数:251 000

定价:87.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

自升式平台在海上油气资源开发过程中扮演着重要角色，因其服役环境的特殊性，一旦发生安全事故，往往导致财产及人员的重大损失。因此，自升式平台在役性能评估一直是业内科研与工程人员关注的重点。

本书是作者根据多年对自升式平台在役性能评估研究的成果撰写而成的。针对不同评估内容，参考船级社规范，以数值计算为主要手段，并辅之以相关参数对平台在役性能影响规律分析，确定自升式平台在役性能评估方法。全书共7章，分别为绪论、自升式平台环境载荷推算、拖航/就位工况下平台稳性研究、插/拔桩工况下桩土作用机制、站立工况下平台静态/动态响应特性、站立工况下平台桩腿管节点疲劳寿命评估、意外工况下平台的碰撞特性。本书在反映海洋装备领域研究前沿的同时，又体现出研究成果的实用性，对自升式平台在役性能评估研究与应用具有很好的指导意义。既可供从事自升式平台设计、建造与使用的工程技术人员参考，也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

本书由唐文献教授与张建博士对全书架构与各章内容进行顶层设计、详细规划，并带领研究团队进行书稿撰写。参与本书撰写的有：唐文献、秦文龙（第1、2章），唐文献、唐振新（第3章），张建、杨栋（第4章），张建、相升旺（第5章），唐文献、赵海洋（第6章），潘宝俊、韦有溯（第7章），此外，研究生张奔、杜雨辰、吴文乐、高泽、倪路瑶、钱浩等也参与了部分编写工作。本书的部分研究工作得到了江苏省“六大人才高峰”项目（2011A031）及烟台来福士海洋工程有限公司、南通润邦海洋工程装备有限公司的资助，在此一并表示衷心的感谢。同时，该书的出版得到了科学出版社的大力支持和帮助，作者也在此表示真诚的感谢。

作者在本书中尽可能详述自升式平台在役性能评估的关键内容，但由于自升式平台在役性能评估一直处于发展之中，再加之作者水平有限，难以全面、完整地将当前的研究前沿和热点问题逐一探讨。书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2015年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自升式平台在役性能评估背景	1
1.2 自升式平台结构及在役工况	2
1.2.1 平台结构组成	2
1.2.2 在役工况分析	3
1.3 自升式平台在役性能评估现状	5
1.3.1 自升式平台环境载荷	5
1.3.2 拖航/就位工况下平台稳性	6
1.3.3 插/拔桩工况下桩土作用机制	7
1.3.4 站立工况下桩腿动静响应	7
1.3.5 站立工况下桩腿疲劳寿命	8
1.3.6 意外工况下平台碰撞特性	9
1.4 自升式平台在役性能评估框架设计	11
1.5 本书主要内容	12
第 2 章 自升式平台环境载荷推算	14
2.1 环境载荷计算	14
2.1.1 环境参数设定	14
2.1.2 海风载荷计算	14
2.1.3 波浪载荷计算	15
2.1.4 海流载荷计算	17
2.2 基于一维极值分布的环境参数推算	18
2.2.1 环境资料获取与样本构造	18
2.2.2 一维极值分布优选理论	20
2.2.3 一维极值分布优选工程应用	22
2.2.4 环境参数推算	24
2.3 基于二维极值分布的环境参数推算	24
2.3.1 主导与伴随要素相关性分析	24
2.3.2 二维极值分布优选理论	25
2.3.3 二维极值分布优选工程应用	26

2.3.4	环境参数推算	28
2.4	风阻系数及其影响规律分析	29
2.4.1	研究对象与风阻系数定义	29
2.4.2	仿真风载荷求解与评价	31
2.4.3	风阻系数随风向角变化规律分析	36
2.5	弦杆拖曳水动力系数及其影响规律分析	38
2.5.1	研究对象与拖曳水动力系数定义	38
2.5.2	仿真流载荷求解	40
2.5.3	粗糙度影响规律分析	41
2.5.4	入射角影响规律分析	45
第3章	拖航/就位工况下平台稳性研究	51
3.1	拖航工况下平台稳性研究	51
3.1.1	拖航系统数值模型构建	51
3.1.2	平台稳性影响因素分析	52
3.2	就位工况下平台稳性研究	57
3.2.1	就位工况数值模型构建	57
3.2.2	降桩工况平台稳性分析	58
3.2.3	系泊状态平台稳性分析	64
3.3	基于多目标优化的平台定位方法探讨	75
3.3.1	定位系统优化模型构建	75
3.3.2	优化结果分析与讨论	78
第4章	插/拔桩工况下桩土作用机制	80
4.1	插/拔阻力理论计算	80
4.1.1	插桩阻力公式	80
4.1.2	拔桩阻力公式	83
4.2	自升式平台插/拔桩数值模拟分析	87
4.2.1	插/拔桩数值模型构建	87
4.2.2	插桩阻力影响因素分析	90
4.2.3	插桩土体流动机制	91
4.2.4	拔桩阻力影响因素分析	92
4.2.5	拔桩土体流动机制	94
4.3	集成分析平台开发与应用	95
4.3.1	集成分析平台开发	95
4.3.2	工程应用	103

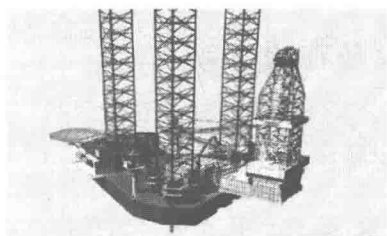
第 5 章 站立工况下平台静态/动态响应特性	112
5.1 平台桩腿静态响应特性	112
5.1.1 结构数值模型构建	112
5.1.2 响应结果	116
5.1.3 特征指标校核	119
5.2 平台桩腿动态响应特性	121
5.2.1 平台自振特性分析	121
5.2.2 基入射角响应分析	124
5.2.3 入射角影响规律分析	127
5.3 南海北部湾处平台动态响应	129
5.3.1 环境参数与流体动力参数配对	129
5.3.2 平台位移响应差异性分析	130
第 6 章 站立工况下平台桩腿管节点疲劳寿命评估	133
6.1 几何参数对管节点应力影响规律分析	133
6.1.1 管节点数值模型构建	133
6.1.2 几何参数影响规律分析	134
6.2 理想状态下的桩腿疲劳寿命评估	140
6.2.1 基础理论分析	140
6.2.2 热点疲劳寿命评估	143
6.3 实际状态下桩腿疲劳寿命评估	149
6.3.1 基础理论分析	150
6.3.2 热点疲劳寿命	151
第 7 章 意外工况下平台的碰撞特性	159
7.1 对心工况碰撞响应	159
7.1.1 对心碰撞数值模型构建	159
7.1.2 碰撞前初始应力分析	161
7.1.3 对心碰撞响应分析	162
7.1.4 碰撞参数影响规律分析	167
7.2 非对心工况碰撞响应	175
7.2.1 非对心碰撞响应分析	175
7.2.2 对心与非对心碰撞对比	181
参考文献	182

第 1 章 绪 论

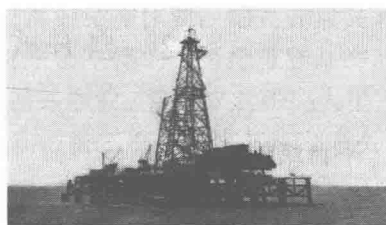
1.1 自升式平台在役性能评估背景

目前,我国正处于实现工业化的经济高速发展期,由经济高速增长所带来的能源需求不断增加,其中对油气的需求量更是急剧增大。但我国油气产量却无法满足不同需要,新增的石油需求量绝大部分要依靠进口,且对外依存度也呈逐年上升趋势。以石油为例,2012年,对外依存度为56.4%,而根据《能源发展“十二五”规划》目标,至2015年石油对外依存度必须控制在61%以内。因此,进一步提高自身油气资源的开发广度和深度,显得尤为重要。

海洋油气资源的开发需求推动了海洋工程装备的发展。我国已经将海洋工程装备制造明确列入“十二五”期间重要扶持的先进制造业之中,2015年,海洋油气开发装备关键系统和设备的配套率要求达到30%以上,2020年达到50%以上。另外,根据《世界海洋工程资讯》统计,截止到2012年年底,自升式平台558座,固定式平台248座,半潜式平台238座,坐底式平台4座和钻井船156艘,可见自升式平台更是海洋工程装备中的主角,见图1.1。



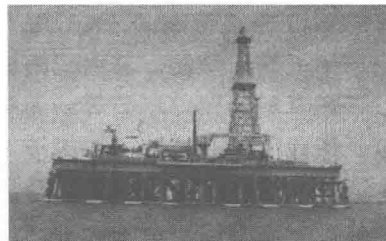
(a) 自升式平台



(b) 固定式平台



(c) 半潜式平台



(d) 坐底式平台

图 1.1 海洋平台分类

可是,自升式平台在带来巨大经济价值的同时,各类操作工况下的安全事故却屡有发生。首先需要指出的是,环境载荷的预估失准是各类安全事故的主要原因。例如,2010年,由于第9号热带风暴“玛瑙”的影响,中国石油化工集团公司(简称中石化)某海上石油修井平台在作业过程中发生倾斜倒塌事故,事故发生时,海上最大阵风9级,浪高近4米。即使是在环境载荷预估准确的情况下,由于响应评估技术的失准导致的安全事故也时有发生。在拖航/就位工况下,平台遭遇强风暴时会导致结构受损、舱室进水致使其稳性不足最终倾覆沉没。在插/拔桩工况下,插桩时经常遇到上层土抗剪强度大于下层土的“鸡蛋壳”地层,当对地基承载力预估错误时,则发生平台“刺穿”;拔桩时,拔桩力全部是由平台浮力提供的,如果土壤阻力过大,则会造成桩靴无法上拔,平台无法移位。在站立工况下,尤其是自存工况下的平台极易由于土壤所提供的翻转抗力与水平抗力不足发生倾覆与滑移等现象,此外长时间遭受环境载荷的反复作用,使得平台结构件中所受的应力反复变化,最终引发关键位置的疲劳损坏问题。对于意外工况而言,意外碰撞占平台损伤事故的22%,据WOAD数据库对相关碰撞事故的统计发现,1980年至今,各类撞击或者近距离接触导致,继而引发整个平台不能继续正常工作的事故达到了6起,还有几例事故导致平台达到几乎倾覆的程度。

上述安全事故所引发的财产损失、人员伤亡与油气泄露给自升式平台的推广使用蒙上了阴影。因此,对自升式平台进行系统性的在役性能评估具有显著的现实意义。

1.2 自升式平台结构及在役工况

1.2.1 平台结构组成

本书以 Super M2 自升式海洋平台为参考对象,研究自升式平台的在役性能评估方法。从组成上来看,自升式平台由平台主体、直升机甲板、悬臂梁、钻井架、不同型号起重机($\times 3$)、桩腿($\times 3$)以及桩靴($\times 3$)等构成,见图 1.2。其中,平台主体是一个单甲板箱形结构,其内部根据作业、布置和强度要求设有纵舱壁和横舱壁。甲板以下布置柴油发电机舱等动力舱、泥浆泵舱等钻井工程用舱室,还有燃油舱、淡水舱、压载水舱等液体舱。甲板上布置有钻台、井架、钻杆、隔水管堆场、起重机、生活舱室、升降装置室、直升机平台等。桁架式桩腿与圆形桩靴作用主要是在平台主体升起后支撑平台的全部重量,并把载荷传至海底,同时,还要经受住各种环境外力的作用。升降系统安装在桩腿和平台主体的交接处,可以使桩腿与平台主体作相对的上下运动,还可以将主体固定于桩腿的某一位置,此时升降装置主要承受垂直力,水平力则由固桩装置传递。

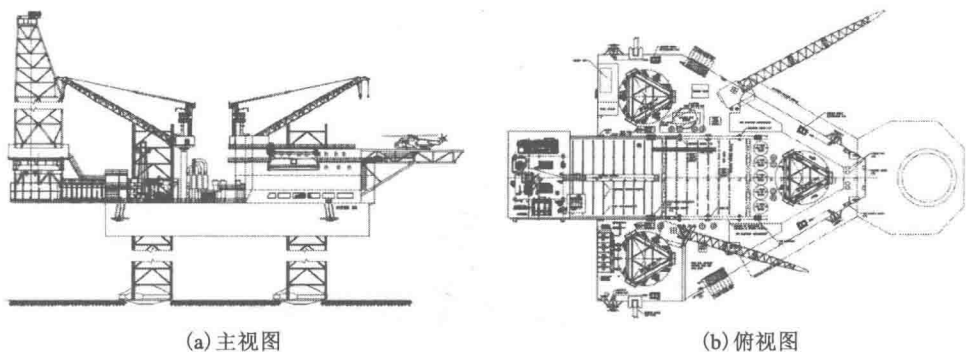


图 1.2 自升式平台装配图

1.2.2 在役工况分析

自升式平台工况以操作时序进行划分：拖航，就位，插桩，预压，升起平台主体，作业，降下平台主体，拔桩，拖航，……，循环往复，直至服役期满。具体流程如下，自升式平台拖航到井位后，桩腿要下放到一定位置，在各就位锚缆的辅助下，逐渐向生产平台靠近就位，然后进行插桩完成就位。在插桩完成后平台开始压载，压载是将桩腿下面地基的承载力预先压到暴风状态所要求的地基承载力，避免极限环境条件下桩腿出现不均匀下沉，造成平台倾斜或倾覆事故发生，压载一般靠压载水的重量实现。压载完成后将平台主体沿着桩腿升到离海面一定高度，以避免波浪对平台主体底部的冲击。接下来进行平台正常的钻井作业，钻完井后离开井位时，先将平台主体下降到水面，利用水的浮力对平台主体的支持把桩腿从海底拔出并升起，然后进行拖航移到新的井位开始下一次钻井作业。接下来对研究人员重点关注的 4 类工况进行简述，包括拖航/就位工况、插/拔桩工况、站立工况与意外工况。

1. 拖航/就位工况

拖航工况指平台作为被拖物由拖船拖带，由某一地理位置向另一地理位置转移时所处的状态或过程，见图 1.3。拖船将自升式平台拖至距离作业场区域 5 海里左右，平台减速准备降桩，然后将桩腿下放至一定位置后使用锚泊系统进行精就位，精就位所需时间一般较长，根据就位要求和现场情况，一般需要 2~6 天不等。在拖航工况，桩腿一般处于完全升起状态，且已采取了多种固定措施。在升降工况，已经拆除固桩块等固定装置，桩腿处于正在上升或下降的运动状态。就位过程中桩腿逐渐下降处于升降工况，由于桩腿的下降速度特别小，一般每小时的下降量仅十几米到几十米。



图 1.3 自升式平台拖航工况

2. 插/拔桩工况

自升式平台插桩过程就是平台由漂浮状态过渡到桩腿支撑状态的过程，拔桩过程与之相反。由定义可知，插/拔桩工况内平台始终与海底土壤之间有相互作用关系。平台在插桩时桩腿承受升降机构的下降力、桩腿土壤支反力和桩周摩擦力的作用。拔桩时桩腿承受升降机构的提升力、桩端黏结力以及桩周摩擦力的作用，若在淤泥中还有桩端淤泥的吸附力的作用。插拔桩作业一般在风速不大于四级，波高不大于 1 米的情况下进行，以避免平台产生过大的垂荡运动，使桩腿与海底间发生碰撞。

3. 站立工况

站立工况包括作业工况和自存工况两种。平台主体被桩腿支撑于海面之上时，平台主体上的甲板载荷和风力将通过桩腿传递到海底，此时桩腿将受到风力、潮流力、波浪力、平台的重力和地基反力的作用。在作业工况下，平台将伸出悬臂梁并借助钻井架与其他钻井工程配套设备进行钻井作业。在自存工况下，平台将停止作业，收回悬臂梁。如图 1.4 为自升式平台站立工况。

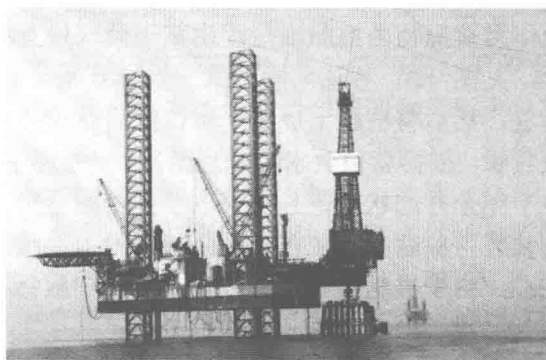


图 1.4 自升式平台站立工况

4. 意外工况

意外工况,包括平台漂浮工况下舱室破舱,或平台站立工况时与船舶发生碰撞,尤其是后者,本书中所提及的意外工况特指意外碰撞工况。从历史数据可以发现,海洋钻井平台与船舶碰撞事故频率在整体上呈下降趋势,尽管如此,所有海洋钻井平台事故中此类事故仍然占据较大的比例。一般情况下引起海洋钻井平台与船舶发生碰撞的操作,其中平台物体移动与供给船停靠平台,这两种情况占据所有事故的 3/4。另外,引发海洋钻井平台发生重大损伤的碰撞事故中,有一起是船舶停靠平台所致,另一起是过路船舶导致的。由于平台物体转移引起的碰撞事故对海洋钻井平台不造成或造成较小的损坏。事故原因中船舶驾驶员的个人原因,如操作失误或判断失误占到了近一半,这些事故往往会导致平台的损伤。

1.3 自升式平台在役性能评估现状

1.3.1 自升式平台环境载荷

2012年,美国船级社 ABS 与中国船级社 CCS 指出作业工况下环境参数推算方法可采用百年一遇风速与百年一遇波高进行组合作为环境参数,称为单因素法。其研究重点在于求出各环境变量对应的一维极值分布,具体被细分为极值分布选取及参数估计方法。一维极值分布的选取范围包括,以 P-III型为代表的经验分布,与以广义极值分布(GEV)为代表的理论分布集,涵盖耿贝尔(Gumbel)分布(极值 I 型),Frechet 分布(极值 II 型),韦布尔(Weibull)分布(极值 III 型),此外还有最大熵模型等其他分布模型。一般地,工程计算中常用的是耿贝尔分布、对数正态分布及二参数韦布尔分布。极值分布和参数估计方法往往会随着统计对象改变而呈现出不同的拟合表现,很难直接判断优劣性,因此在面对新海域单变量环境样本时,仍需要对极值分布和参数估计方法进行寻优。

2000年,美国石油协会 API 指出自存工况环境参数计算可选用百年一遇波高及“相伴随”的风速,可以看出该法考虑了变量间的相关性。2011年,DNV 规范又指出作业工况环境参数计算也应考虑联合概率分布,并指出重现期应该 100 年。同年,刘伟据此思想给出了基于众值与均值的条件概率分布设计法,该方法的研究重点则在二维极值分布的选取上。在面对新海域双变量环境样本时,需要对不同 Copula 分布之间, Copula 分布与传统极值分布之间进行二维极值分布优选,尤其是后者之间的对比仍鲜见报道,有必要进行数据积累。

目前对自升式平台风阻系数的研究较少,主要报道仍集中在各船级社规范中给出的定义与相应推荐值。此外,为了能够对风阻系数进行反算,也需要关注风载荷

的计算方法,这方面的研究已经有了大量的数据积累。风载荷研究的重点放在了对最终载荷计算而非其风阻系数的研究上,这使得风载荷的丰富的研究成果并不能有效地辅助工程计算,造成应用最为广泛的规范计算仍使用推荐值,精度停滞不前,限制了结构设计人员对于环境载荷的计算精度。

拖曳水动力系数定义源于在波流载荷计算时常用的 Morison 公式。CCS 中对拖曳水动力系数给出了推荐值,对圆形构件,取 0.6~1.2,对于弦杆此类的非圆截面构件并未给出推荐值。此外,为了能够对拖曳水动力系数进行反算,也需要关注波流载荷的计算方法。除 DNV 规范外,对于桩腿弦杆为对象的拖曳水动力系数鲜见报道,因此有必要对该特定外形下的构件拖曳水动力系数进行研究,并给出不同粗糙度与入射角下拖曳水动力系数变化规律,并与 DNV 规范进行对比。

1.3.2 拖航/就位工况下平台稳性

对于一般海洋浮体的拖航稳性评估工作国外研究较早,Strandhagen 运用线性理论发现改变拖带点的位置和拖缆绳长度可以保持拖航系统的航向稳定性。Inoue 等也通过运用线性理论来研究多条被拖船拖航作业时航向稳定性保持的问题。他们通过整理分析得到在拖带作业时缆绳的弹性、缆绳的重量会影响系统的航向稳定性。Bernitsas 等对在弹性拖缆条件下被拖船的非线性稳定性进行了研究分析。Charters 等通过运用线性时不变经典拖航理论研究了浅水对四种典型的被拖船拖航航向稳定性产生的影响,并提出了拖航稳定性参数。国内来看,严似松和黄根余建立了静水中拖航系统的操纵性运动的数学模型,并分析了缆长、载重量、纵倾等参数对拖航系统直线运动的影响,之后又模拟了拖航系统在风浪中的操纵性运动,分析了拖航速度、拖缆长、纵倾、载重量、环境条件等因素对拖航系统的运动和拖缆力的影响,但忽略了水动力非线性部分,没有全面反映系统的操纵性能。

对于自升式平台的拖航稳性而言,潘斌计算了各类型自升式平台在不同拖航操作状态下的稳性,并根据计算结果分析研究了这些操作的利弊。段艳丽对自升式平台拖航状态进行了完整稳性的计算分析,并利用 ANSYS 软件的二次开发功能解决了锚泊悬链线的建模问题,以及对平台施加波浪载荷的难题,与此同时,其针对不同海况对桩腿升降过程的平台稳性进行了详细的分析探讨。何堃等进行了自升式平台就位过程桩腿触底分析,对就位降桩过程稳性分析涉及较少。徐志海详细阐述了自升式平台各操作工况中需要注意的关键技术,在移航工况时允许部分桩腿低于平台主体基线,不仅能减少起升的时间,还可减小拖航中桩腿的惯性载荷,且因受风面积减小而增加平台稳性。

对于浮体系泊定位稳性评估而言,王丹丹等利用数值模拟法,研究了锚泊浮体在风、浪、流联合作用下的运动响应规律及锚链线张力变化规律。采用了三维锚链线静力模型和浮体频域运动模型这两种数学模型。求解出锚泊浮体运动方程,从而

得到了锚泊浮体的运动响应及锚链线的张力变化规律,提供了具有工程精度的锚泊性能预报。张凤伟运用 AQWA 软件建立了风机安装船的频域计算模型,对安装船的水动力性能进行了系统的分析;同时设计了该模型的系泊系统,对系泊系统和吊物系统在各海况下对船体运动的耦合影响进行了分析,并验证了系泊系统设计的合理性。

1.3.3 插/拔桩工况下桩土作用机制

目前,研究自升式平台插/拔桩机理主要有试验法、数值法和解析法。一般先采用试验验证数值模型的正确性,以此进行土壤几何和物理参数、桩靴尺寸及粗糙度等参数的灵敏度分析,对传统解析法给出的经验公式进行修正,进而指导自升式平台安装过程。

试验法主要分为现场测试、一倍重力加速度试验和土工离心试验。现场测试是指在平台实际工作过程中对插/拔桩性能、土壤受力变形特性进行研究,但由于实际海况非常复杂、土壤性能参数获取有限,对插桩理论研究作用不大。一倍重力加速度试验的土壤自重覆盖应力水平比真实情况的应力水平低 1~2 个数量级,该试验无法精确描述实际土壤的自重应力状态,进而无法精确评估土壤流动机制。而土工离心试验可以方便重现随着深度变化的土壤覆盖应力,对揭示土壤变形机制、坍塌失效、验证数值模型具有特殊价值。但是土工离心试验无法建立复杂形貌的土壤,如有机物的土颗粒、二次压缩。

数值仿真在插/拔桩分析中的应用近年来越来越受到更多学者关注,与土工试验及解析法相比,数值法可以提供更为详细、精确的结果,获得验证的数值模型可以放心地用于研究新的、更加复杂的现场环境。数值法主要分为:小应变分析法(SSFE)、大位移有限元法(LDFE)、欧拉-拉格朗日耦合法(CEL)三类。SSFE 又叫“预埋法”,即在建模时就把桩靴放到关心的插桩位置,并假定桩靴周围土壤应力状态,分析该处的插桩阻力、土壤变形等问题,但是该方法无法反映土壤连续变形过程;与 SSFE 相比,LDFE 结合网格自适应技术(ALE、RITSS),考虑几何、边界和材料非线性特性,可以有效分析插桩过程中表面隆起、局部回流、壁面坍塌等土壤流动失效现象。而对于层状分布土壤(如可能存在刺穿事故的硬土-软土地质)的插桩问题,SSFE 无法精确分析,LDFE 则能够有效分析土层形状变化及土壤流动失效模式。上述两种方法的求解结果严重依赖网格和求解参数,而且对求解结果的解释需要丰富的工程经验。对于桩靴贯入/拔出问题,CEL 法非常适合解决经典有限元法所不能分析的大变形土工问题。

1.3.4 站立工况下桩腿动静响应

Bent 等采用均值为零的高斯随机过程方向波浪谱对不同作业水深的导管架平台

结构进行了动态特性分析,用模态叠加法在频域内进行谱分析。Hsien 等对平台在风浪流环境载荷联合作用下的结构进行了动态特性分析,选取五阶 Stokes 波浪理论和 Morison 方程模拟波浪载荷对平台上构件的作用,运用非线性 Newmark 法得到在波浪载荷作用下减少平台结构系统振动的方法。Harem 等分析了在非高斯海况中深海导管架平台的频域响应,对比了在非高斯分布波浪载荷作用下的概率响应,此外还分析了荷载二阶项对平台甲板响应的影响。通过 Morison 方程的广义形式和运动转换,在海洋平台的分析中引入波浪—结构的相互作用。Silva 等建立了自升式平台的三维模型,使用 AR-ARX 模型基准结构诊断桩腿的损伤,并考虑修正 Pierson-Moskowitz 波浪谱,编辑程序后加载波浪载荷,针对波浪载荷方向不变的情况对平台进行了随机响应分析。Bienen 等以神经网络的方法建立了平台结构的初始状态和运动方程,相对速度的均方根的迭代解析作为求解程序的一部分。运用最小二乘法线性化了黏滞拖曳力项之和,避免导致散射阻尼项和非线性阻尼项,对环境载荷联合作用的平台结构进行了动力特性分析。

国内也在自升式平台桩腿动静强度分析方面进行了大量研究工作,作出了巨大贡献。李红明等以自升式平台桩腿为研究对象,对其碰撞条件下是否有 CFRP 加固的情况分别进行了受力性能分析。谢娜娜等介绍了采用 ANSYS、Workbench 进行自升式平台桩腿静力、模态、波流耦合等分析的理论及过程,通过计算分析验证了有限元方法的可靠性,研究结果对改善桩腿质量具有重要意义。任宪刚等以自升式平台桩腿为研究对象,对桩腿在风暴和作业状态下的应力和位移进行分析。郝林等采用有限元分析软件对自升式平台自振动频率进行计算,经过仿真计算与现场实测结果进行对比,分析了桩腿与平台主体连接的可靠性。李红涛介绍了自升式移动平台动力响应模型建模的关键技术,并详细论述了动力响应求解的 3 种方法,单自由度方法、频域分析方法和时域分析方法,并以某桁架式桩腿自升式平台为例,计算了运动惯性力及动力放大系数,并对 3 种方法的分析计算结果进行了比较。

1.3.5 站立工况下桩腿疲劳寿命

对于 S-N 曲线疲劳寿命预测方法而言,Wirsching 研究了自升式平台连接部位的焊接点疲劳可靠性问题,探讨了疲劳理论等一些较为成熟的理论,基于此最终推导出了疲劳分析方法的概率模型。并在此基础上研究了海洋结构的疲劳可靠性,提出了一个封闭表达式,该表达式能够评价疲劳失效概率。李明等根据 Airy 波理论,利用 ANSYS 软件对自升式平台所受的风、浪、流载荷进行施加计算,从而得到自升式平台结构的应力,再结合管节点的热点应力公式对所得的结果进行二次处理,便可得到实际的疲劳应力,最后基于 S-N 曲线及线性累积理论便可得出自升式平台构件的疲劳损伤。刘刚等对半潜式钻井海洋平台进行疲劳寿命分析,并在此基础上建立了子模型即管节点局部有限元模型,进行疲劳寿命分析。然后通过应用规范中提

及的热点应力法计算管节点危险处的应力幅值,并结合 DNV 规范中 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤理论,最终完成了对管节点结构的疲劳分析。Gupta 和 Singh 等详细研究了海洋平台导管架平台结构的疲劳特性,通过运用应力集中系数公式和 S-N 曲线来对结构管节点进行疲劳损伤分析,同时也探究了各个因素对于结构疲劳损伤的影响情况。谢文会等考虑深水半潜式钻井平台各种危险工况,通过有限元模拟了平台结构的应力分布云图。然后通过谱分析方法与 Miner 线性疲劳累积损伤准则,计算了平台危险点的疲劳损伤,得出了简化疲劳分析的方法。

此外,利用裂纹扩展的疲劳分析方法对海洋平台结构进行疲劳寿命分析和安全特性评估,国内外研究的相关论文也比较多。其中,Almar-Nass 主要针对海洋平台金属结构的疲劳强度进行了分析。主要从环境载荷、管节点的疲劳特性、初始缺陷、管节点疲劳强度的提升、防腐蚀、裂纹扩展理论、断裂机理、疲劳损伤分析、疲劳分析标准等多个方面进行了试验与理论分析。Ramsarnooj 等主要研究断裂力学在海上工程结构件的疲劳强度与可靠性等方面的应用,且推导出了基于断裂力学的疲劳寿命设计的新方法,研究了在幅值不变的载荷情况下裂纹扩展模型,并运用此方法对具体对象进行疲劳强度和可靠性分析。胡毓仁和陈伯真等采用裂纹扩展的方法来对管节点的裂纹进行分析,采用一阶可靠性方法和相关分布理论模型分析了海洋平台关键点的疲劳可靠性,探究了如疲劳强度的概率模型、受力的概率模型、寿命的可靠性预测等方面的理论。张剑波等利用有限元软件计算了半潜式钻井船关键节点的疲劳损伤,并对几个典型节点进行了可靠性分析和裂纹扩展分析,提出了以应力幅值、裂纹尖端的边界条件,以及发生塑性变形区域的尺寸为主要参数的计算模型,研究了载荷相互作用下疲劳裂纹展寿命。崔维成等研究了焊缝的裂纹几何参数对焊接结构件疲劳寿命的影响,并分析了焊缝在打磨的情况可以改善其使用寿命。运用裂纹扩展率单一曲线模型,研究了在恶劣的海洋环境下海洋钢结构的疲劳寿命问题。

1.3.6 意外工况下平台碰撞特性

海洋结构物碰撞是一个非常复杂的问题,这一过程中涉及跨学科、跨领域的问题。碰撞的发生往往是在很短时间内(一般不超过 2 秒)完成的,由于瞬时间受到很大的冲击作用,碰撞系统呈现出非常复杂的瞬态非线性动态响应过程。而且这一过程中存在着大量的非线性问题,包括几何非线性、材料非线性、运动非线性和接触非线性等。而且海洋结构物的碰撞跟陆上的结构碰撞是有明显差别的,它所处的环境更加复杂,涉及流体的作用,因此,这是一种典型的流固耦合问题。

海洋结构物碰撞问题的研究最早可追溯到 20 世纪 50 年代,Minorsky 在《Journal of Ship Research》中首次讨论了有关这一问题的论文,这标志着世界范围内研究学者在海洋结构物与船舶发生碰撞问题研究方面的一个开端。20 世纪 90 年代以来,随着国内对资源需求的不断增加,国内的海洋平台研究建造技术的提高,我国的海

洋钻井平台数量在快速增长,这也吸引了国内的一些相关研究学者转向海洋钻井平台与船舶碰撞方面的研究,并且到目前为止也取得了一些进展。

船舶与海洋钻井平台碰撞属于船舶碰撞问题的一部分,属于碰撞力学分析范畴,而船舶碰撞问题的研究已有 50 多年历史,相对来说已经较为成熟。船舶碰撞力学机理一般被分为外部机理和内部机理。外部机理是分析碰撞船和钻井平台发生碰撞时运动相关特性;而内部动力学机理是分析局部碰撞构件破坏变形与撞击力之间复杂的非线性关系。

研究船舶碰撞力学机理的方法主要包括经验公式法、试验法、简化的解析法和有限元法。经验公式法是研究此领域最早的研究方法,由于碰撞具有偶然性,工况较为复杂,使得经验公式法的研究与工程实际应用仍有较大的距离。试验法虽然可以得到可靠的数据,但代价太大,不易实施。简化的解析法基于一系列假设的基础之上的。而且因为碰撞中撞击区域结构件在受强烈的撞击载荷作用后,会引起较大的塑性变形,结构件内部肯定会存在显著的接触作用,但基本上所有的简化解析方法都把这种相互接触作用效果给忽略了,而假定各个结构件都不受其他因素影响地贡献自身抗撞强度,这种假设和实际碰撞发生的情景是不符合的,是简化解析方法目前无法解决的缺点。

有限元法是目前研究此类复杂瞬态非线性动力学问题的最有效的研究手段。考虑到船舶与海洋平台发生碰撞的场景是在海洋中,其中海水的作用不可忽视,所以这是一个典型的流固耦合问题。海洋平台的结构是非常复杂的,想要在有限元方法中把完整的模型建出来是极其困难的工作,所以有限元法中对海洋平台做了一定的简化。在使用有限元数值解析法分析碰撞船与钻井平台碰撞的问题中,逐渐形成的三种建模方法为:等效平台主体梁法、附加水质量法和流固耦合法。等效平台主体梁法是将碰撞系统中没有发生损伤变形的部分结构质量分离出来,再以等效平台主体梁的形式放到有限元模型上,这种方法很大程度上缩短了有限元建模的时间,也在一定程度上提高了计算机仿真运算的速率。尽管有一些优点,可是此方法的缺点也是明显的,如所应用的约束条件和真实情况是有区别的,这样就导致了碰撞过程中应力传递上的差别,从而影响了碰撞船与平台之间所进行的动能转化过程。附加水质量法是将碰撞过程中流体的作用效果以附加水质量的方法考虑到系统中来的一种建模方法,这样方法可以回避流固耦合的复杂建模运算过程,缩短了模型所需要的运算时间,而且仍然可以获得较为精确的分析结果,是目前应用较多的建模方法。流固耦合法虽然是解决船舶与海洋平台碰撞的理想方法,但是由于计算机水平的限制,目前利用流固耦合法进行计算还非常困难。