

摘 要

近年来随着海洋石油开发事业的发展,海洋工程亦随之发展起来。海洋平台是钻井采油和生活供应等多种用途的大型复杂结构,由于其工作环境的恶劣以及结构的复杂性,其安全问题受到人们普遍重视,而对其结构进行准确的强度和可靠性分析便成为一个重要的研究课题。本文采用有限单元法,以大型自升式海洋石油钻井平台南海一号为例,运用大型软件 Patran 建立与原结构相当的三维有限元模型,并利用有限元软件 ABAQUS 中的 Aqua 海工模块进行波浪载荷模拟计算,确定最不利环境载荷等,计算各组合工况下平台结构的应力和变形情况,对平台结构强度进行分析和校核。本文主要工作如下:

1. 根据平台整体结构的实际设计图纸等相关资料,对大型自升式平台南海一号的整体结构进行了合理简化,建立了平台结构的有限元分析、计算模型,有限元计算模型与实际结构基本一致。

2. 根据平台实际所承受的各种载荷情况以及平台所处的海域条件等,利用有限元软件 ABAQUS 中的 Aqua 海工模块进行了波浪载荷模拟计算,给出了平台结构可能承受到的载荷工况及其组合工况。

3. 使用大型分析软件 ABAQUS,分别对风暴自存和钻井作业两种状态下平台结构进行了强度计算,分析平台的桩腿和主体结构的强度,并对平台整体结构进行了抗倾覆计算与分析。结果表明,采用有限元方法完全能够计算、分析海洋石油平台这样的大型复杂结构的力学行为,计算结果可为工程实际提供可靠的理论依据。

关键词: 自升式海洋平台, 整体强度, 有限元法, 抗倾覆

Abstract

With the development of the offshore oil exploitation in recent years, the ocean engineering has also developed. As a large and complex structure for drilling and living, because of its tough work environment and special structural complexity, the platform's security has received more and more attention. It is a very important subject to analyze the whole structure strength accurately. Finite element method of elasticity is used in the thesis. As an example, the structural strength analysis of a jack-up platform—Nanhai 1 is introduced in this thesis. With software Patran, a 3D finite element model is established. Then wave load calculation is carried out with ABAQUS, and the disadvantageous environmental load is determined. According to several load cases, the stress and deformation results of the whole structure are obtained. The thesis mainly consists of the following contents:

1. According to the related data information, such as the drawings; simplifying the whole structure properly, establishing 3D finite element model with finite element software Patran, letting it match the actual structure;

2. According to load cases and the environmental situation of the seas, wave load calculation is carried out with module Aqua of ABAQUS, load cases and combined cases are given;

3. The strength of the platform in survived and drilling mode is analysed with ABAQUS, mainly the strength of the legs and the main structures, and anti-overturning of the platform is carried out.

The result showed that the finite element method can calculate and analysis the large and complicated system as the platform. The result can supply the reliable digital information for the real project.

Key words: jack-up platform, the whole structure, anti-overturning

图形目录

图 2.1	MSC.Patran 的一般使用流程	8
图 2.2	过程分析流程图	9
图 3.1	南海一号目前作业海域与将来海域气隙图	10
图 3.2	OFFSET 命令使用前后的差异	12
图 3.3	平台的实景照片	13
图 3.5	船体及上部结构	13
图 3.7	船体主甲板有限元模型	14
图 3.9	船体底甲板	14
图 3.11	桩腿有限元模型	14
图 3.13	舱室结构	15
图 3.15	直升机甲板	15
图 3.16	作业状态一阶振型	16
图 3.18	作业状态三阶振型	16
图 3.20	自存状态二阶振型	17
图 4.1	浪向示意图	21
图 5.1	自存状态下平台整体应力分布	24
图 5.2	自存状态下平台桩腿位移图	25
图 5.4	自存状态下主甲板板单元应力分布	28
图 5.6	自存状态下机械甲板板单元应力分布	29
图 5.8	自存状态下底甲板板单元应力分布	31
图 5.10	自存状态下舱壁板单元应力分布	33
图 5.12	自存状态下舷侧板单元应力分布	35
图 6.1	作业状态下平台整体应力分布	37
图 6.2	作业状态下平台桩腿位移	39
图 6.4	作业状态下主甲板板单元应力分布	41
图 6.6	作业状态下机械甲板板单元应力分布	43
图 6.8	作业状态下底甲板板单元应力分布	44
图 6.10	作业状态下舱壁板单元应力分布	46
图 6.12	作业状态下舷侧板单元应力分布	48

表格目录

表 3.1	平台结构固有频率.....	16
表 4.1	计算风速.....	19
表 4.2	计算水深.....	19
表 4.3	波浪与水流参数.....	19
表 4.4	阻力和惯性力系数的选择.....	20
表 4.5	风、浪、流的组合.....	20
表 4.6	基本工况.....	21
表 4.7	组合工况.....	22
表 5.1	自存状态平台负荷明细.....	23
表 5.2	波高 (m) 和周期 (s).....	23
表 5.3	流速 (m/s).....	23
表 5.4	海生物.....	24
表 5.5	自存状态下许用应力系数.....	24
表 5.6	自存状态下桩腿的最大位移表.....	25
表 5.7	自存状态下桩腿的最大等效应力表.....	25
表 5.8	自存状态 90 度浪向桩腿高应力单元列表.....	25
表 5.9	自存状态桩腿梁单元最大应力校核.....	26
表 5.10	自存状态下主甲板板单元的最大等效应力表.....	26
表 5.11	自存状态 0 度浪向主甲板板单元高应力单元列表.....	26
表 5.12	自存状态下主甲板梁单元的最大等效应力表.....	27
表 5.13	自存状态 180 度浪向主甲板梁单元高应力单元列表.....	27
表 5.14	自存状态下机械甲板板单元的最大等效应力表.....	28
表 5.15	自存状态 180 度浪向机械甲板板单元高应力单元列表.....	28
表 5.16	自存状态下机械甲板梁单元的最大等效应力表.....	29
表 5.17	自存状态 0 度浪向机械甲板梁单元高应力单元列表.....	29
表 5.18	自存状态下底甲板板单元的最大等效应力表.....	30
表 5.19	自存状态 58 度浪向底甲板板单元高应力单元列表.....	30
表 5.20	自存状态下底甲板梁单元的最大等效应力表.....	30
表 5.21	自存状态 180 度浪向底甲板梁单元高应力单元列表.....	31
表 5.22	自存状态下舱壁板单元的最大等效应力表.....	32
表 5.23	自存状态 180 度浪向舱壁板单元高应力单元列表.....	32
表 5.24	自存状态下舱壁梁单元的最大等效应力表.....	32
表 5.25	自存状态 0 度浪向舱壁梁单元高应力单元列表.....	32
表 5.26	自存状态下舷侧板单元的最大等效应力表.....	33
表 5.27	自存状态 90 度浪向舷侧板单元高应力单元列表.....	34

表 5.28	自存状态下舷侧梁单元的最大等效应力表	34
表 5.29	自存状态 315 度浪向舷侧梁单元高应力单元列表	34
表 6.1	作业状态平台负荷明细	36
表 6.2	波高 (m) 和周期 (s)	36
表 6.3	流速 (m/s)	36
表 6.4	作业状态下海生物厚度	37
表 6.5	作业状态下许用应力系数	37
表 6.6	作业状态下桩腿的最大位移表	38
表 6.7	作业状态下桩腿的最大等效应力表	38
表 6.8	作业状态 90 度浪向桩腿高应力单元列表	38
表 6.9	作业状态平台桩腿梁单元最大应力校核	39
表 6.10	作业状态下主甲板板单元的最大等效应力表	40
表 6.11	作业状态 90 度浪向主甲板板单元高应力单元列表	40
表 6.12	作业状态下主甲板梁单元的最大等效应力表	40
表 6.13	作业状态 0 度浪向主甲板梁单元高应力单元列表	40
表 6.14	作业状态下机械甲板板单元的最大等效应力表	41
表 6.15	作业状态 0 度浪向机械甲板板单元高应力单元列表	42
表 6.16	作业状态下机械甲板梁单元的最大等效应力表	42
表 6.17	作业状态 0 度浪向机械甲板梁单元高应力单元列表	42
表 6.18	作业状态下底甲板板单元的最大等效应力表	43
表 6.19	作业状态 180 度浪向底甲板板单元高应力单元列表	43
表 6.20	作业状态下底甲板梁单元的最大等效应力表	44
表 6.21	作业状态 90 度浪向底甲板梁单元高应力单元列表	44
表 6.22	作业状态下舱壁板单元的最大等效应力表	45
表 6.23	作业状态 180 度浪向舱壁板单元高应力单元列表	45
表 6.24	作业状态下舱壁梁单元的最大等效应力表	45
表 6.25	作业状态 0 度浪向舱壁梁单元高应力单元列表	46
表 6.26	作业状态下舷侧板单元的最大等效应力表	47
表 6.27	作业状态 180 度浪向舷侧板单元高应力单元列表	47
表 6.28	作业状态下舷侧梁单元的最大等效应力表	47
表 6.29	作业状态 0 度浪向舷侧梁单元高应力单元列表	47
表 7.1	K_{z_0} 最小值	50
表 7.2	平台抗倾覆分析	50

独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 李彬彬

时间： 2006 年 6 月 8 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名： 李彬彬

时间： 2006 年 6 月 8 日

导师签名： 李太院

时间： 2006 年 6 月 9 日

第一章 绪论

1.1 研究目的及意义

世界经济的迅猛发展使人类对能源的需求日益剧增，而石油在现代社会中更是具有举足轻重的地位，由于陆地油气资源的日趋枯竭，人类逐渐把目光转向广阔的海洋。

在我们居住的这颗蓝色地球上，海水覆盖面积约为3.61亿平方公里，占地球表面积的71%。广阔的海洋蕴藏着非常丰富的资源，海洋给人类提供的食物能量，等于陆地上所有耕地产品的1000倍，已被世界公认为人类未来的“第二故乡”。海洋石油开发是一项涉及多种学科和工艺部门的综合工程。海洋平台，作为钻井采油和生活供应等多种用途的大型复杂结构，其技术发展和供求变化直接影响海洋石油开发事业的进展；与此同时，随着海洋油气开发产业日益蓬勃，各类海洋平台也应运而生^[1]。

作为海上石油天然气开发及其它工程作业的基地，海洋平台是在无遮掩的海域设置的，其结构复杂，体积庞大，造价昂贵，承受着风、浪、流、冰、潮及地震等随时间和空间变化的随机载荷的考验。由于对海洋环境的复杂性和随机性，以及平台结构的损伤积累和服役安全度等认识不充分，历史上曾有多次海洋平台的事故，造成了重大的经济损失和不良的社会影响。因此，研究海洋石油钻井平台结构的强度与可靠性评估有重要的实际意义。

本论文以实际工程项目为依托，围绕着自升式海洋平台南海一号的安全性评估，结合原设计图纸和改造后的图纸，利用有限元软件 Patran，根据实际载荷分布情况建立了与实际结构相当的有限元模型，并利用有限元软件 ABAQUS 强大的计算功能应用于平台结构的强度计算与分析，研究成果可为海洋石油平台结构的维护和安全评估提供可靠的理论依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 有限元方法

有限元分析 (FEA, Finite Element Analysis) 的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成，对每一单元假定一个合适的(较简单的)近似解，然后推导求解这个域总的满足条件(如结构的平衡条件)，从而得到问题的解。这个解不是精确解，而是近似解，因为实际问题被较简单的问题所代替。由于大多数实际问题难以得到精确解，而有限元不仅计算精度高，而且能适应各种复杂形状，因而成为行之有效的工程分析手段。

自六十年代有限元理论和方法出现以来，就一直是工程结构强度分析的最有效工具，但是由于受计算机速度的限制，对于一些大型复杂工程结构物的分析设计，有限元计算需要花费大量的时间。于是转而提出一些简化理论，对结构采取某种程度的简化，减少建模的单元节点数量，来近似得到分析结果，以节省有限的计算资源。如 Timoshenko 和 Goodier^[2]提出的船体梁理论，就

是应用应力合成的方法,将构件的内力分为总弯曲应力和板梁弯曲应力,分别计算后再进行合成。为了寻求一种非线性极限强度分析的有效方法,Rashed^[3]提出了一种理想结构单元法,即把结构分成最大可能的单元,以简单的形式归并几何非线性与材料非线性;中国船级社在对海洋平台进行强度分析和安全评估时,也采用带板的模式,忽略板梁之间的细节作用,以减少建模和计算工作量,如1998年、1999年对胜利油田的胜利五号、胜利六号钻井平台等进行强度分析评估时,即采用了这种方法。

而随着近年来计算机技术的飞跃发展,大型海洋工程结构物的整体的有限元分析成为可能。一方面,整体三维有限元分析法将结构划分为若干个子结构,并进一步按照具体受力特征分为板、梁、膜、壳等单元,这样可详细而更加真实地描述海洋工程结构的各个细节,更加准确地表达出整体结构的协调关系与变化。通过大规模有限元分析求解,可以求出各主要构件的实际变形与应力;另一方面,高速计算机突破了设计变量和约束条件的限制,人们可以将结构上更细的构件作为优化变量,同时也可以考虑更多的实际约束条件。

从应用数学角度看,有限单元法的基本思想由Courant^[4]在1943年提出。他尝试应用定义在三角形区域上的分片连续函数和最小位能原理相结合来求解St.Venant扭转问题;1956年Turner Clough^[5]等人在分析飞机结构时,将刚架位移法推广应用于弹性力学平面问题,给出了用三角形单元,求得平面应力问题的准确解答。1963-1964年Besseling Melosh和Jones等证明,有限单元法是基于变分原理的里兹(Ritz)法的另一种形式,从而里兹法分析的理论基础都适用于有限单元法,确认了有限单元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。有限单元法和经典里兹法的主要区别是:有限单元法假设的近似函数不是在全求解域,而是在单元上规定的,且事先不要求满足任何边界条件,因此可以用来处理复杂的连续介质问题。60年代后期始进一步利用加权余量法来确定单元特性和建立有限元求解方程,主要是Galerkin法,它可用于已知问题的微分方程和边界条件,但变分的泛函尚未找到或者不存在的情况进一步扩大了有限单元法的应用领域。多年来随着计算机的广泛应用和发展,有限单元法的理论和应用得到迅速的持续不断的发展。有限单元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题板壳问题,由静力平衡问题扩展到稳定问题动力问题和波动问题,分析对象从弹性材料扩展到塑性粘弹性粘塑性和复合材料等,从固体力学扩展到流体力学传热学等连续介质力学领域,在工程分析中的作用从分析和校核扩展到优化设计并和计算机辅助设计技术相结合。可以预计随着现代力学、计算数学和计算机技术等学科的发展,有限单元法作为一个具有稳固理论基础和广泛应用效力的数值分析工具,必将在工程分析和科学技术发展中发挥更大的作用,其自身亦将得到进一步的发展和完善。

1.2.2 海洋结构物的安全评估

海洋平台结构复杂,特别是与陆地结构相比,它所处的海洋环境十分恶劣,海风、海浪流,海冰、地震等载荷时时作用于结构,在这种环境条件下,环境腐蚀和海生物附着等不利因素都将会导致平台结构构件和整体抵抗力衰减,影响结构的安全性和耐久性。历史上曾有多次海洋平台事故,造成了重大的经济损失和人身伤亡^[6]。1979年“渤海二号”自升式平台(中国),死亡72人。1980年北海挪威Ekofisk油田的一座半潜式平台Alexander Kielland号因结构疲劳破坏而倾覆,死亡120余人,堪称海洋工程界的“Titanic”灾难^[7]。1982年“海洋探索者”号(Ocean Ranger)半潜式平台(加拿大),死亡84人。1983年“爪哇海”号(Glomar Java Sea)钻井船(中国),死

亡81人^[8]。

随着世界石油需求量的不断增加及海洋石油和天然气的开发,平台数量也随之增多。与此同时,事故也愈来愈多。各类平台中,自升式平台事故最多,其原因是自升式平台所占比例大,数量多,而且移动性能差。

国外在海洋结构物安全评估的早期,所采用的方法主要是定量风险评估(QRA, Quantified Risk Assessment)方法^[9]。大约在20世纪70年代的中期,展开了几个比较先进的项目,主要是为了研究和发展的目的。项目的目标,是要研究是否存在足够复杂和鲁棒性的数据及其分析方法,研究的对象主要是采用已经在核电厂中使用了三四年的方法和数据。1981年,安全评估又得到了进一步的发展,当时的挪威石油董事会发布了平台概念设计时安全评估的指导性文件。这些法规指出,那些发生概率为1024每年的平台事故应该在设计时被考虑。当所要求的事事故被选出来后,预防性的措施被实施,剩余的风险应予以评估,并与前面所提的概率进行比较^[10]。1990年,英国海洋石油业者联合会提出了综合安全评估方法,对安全评估提出了更高要求。1991年,挪威石油董事会用风险分析规范代替了1981年的指导性文件,这个规范极大扩展了风险研究的范围^[9]。在1992年左右,英国提出了安全事例规范,在现存的和新的海洋结构物的风险评估中奋起直追。在这个规范中,综合安全评估方法作为其中的一个重要组成部分。

随着我国海洋事业的发展,国内对海洋结构物的安全评估也逐渐重视起来:上海交通大学船舶与海洋工程学院的秦炳军和张圣坤^[11]对海洋工程风险评估的理论进行了探讨,涉及了动态系统风险评估和人因可靠性分析技术。上海交通大学船舶与海洋工程学院的俞庆和肖熙^[12]讨论了海洋平台结构风险评估的理论框架,涉及了结构风险评估的几个基本方面,为进一步进行详细研究确立了一条主线。另外他们还导管架式平台的结构风险评估进行了简要讨论。哈尔滨工业大学土木工程学院的欧进萍等人^[13]阐述了海洋平台结构实时计算模型的建立和修正方法,确定了在海洋环境监测的基础上海洋平台结构的实时环境荷载,提出了海洋平台结构实时安全评估的方法,采用 Delphi 开发工具,开发出了 Windows 应用程序“海洋平台结构实时安全监测系统”。该系统于 1998~1999 年和 1999~2000 年冬季两次在渤海 JZ20-2MUQ 平台上试运行,实时监测了 JZ20-2MUQ 平台两个冬季的安全状况。天津大学的胡云昌,黄海燕,余建星^[14]将概率影响图方法引入海洋平台的安全风险评估,将概率影响图的目标定向与风险分析中的 FMEA 方法相结合,成功地构造出了系统分析模型。通过关系矩阵的建立和数据结构的定义,实现了对模型结构的动态描述,并应用程序算法,完成了分析推理的全过程。天津大学管理学院的罗桦槟等人^[15]用事件树技术建立分析模型,对海洋平台的定量风险评估进行了研究,认为传统的经验型安全管理方法已不适用,需要转换为预测型的实时风险管理体系。胜利石油管理局的赵峰^[16]提出了对海洋平台及设备可靠性进行评价的若干指导性要求。大连理工大学船舶 CAD 工程中心^[17]在渤海八号、九号和五号的安全评估项目基础上,探讨了综合安全评估方法在海洋平台上的应用^{[18][19]}。杨树耕等^{[20][21]}采用 ANSYS/Multiphysics 程序,对海上自升式平台结构进行了有限元动力分析;崔镇南等^[22]运用 ANASYS 应用程序软件,进行了海洋平台自振特性分析。欧进萍等^[23]提出了一整套评估导管式海洋平台结构整体安全度的简化方法。天津大学的余建星,黄鑫^[24]从有限元的基本理论出发,对新型海洋平台裙套筒结构进行有限元强度分析及计算。孙玉武,聂武^[25]利用 P-S-N 方法计算了渤海 8 号自升式平台围井区选取点的疲劳损伤及疲劳寿命,从而预报平台的剩余疲劳寿命。国内外许多学者对于海洋平台振动特性或振动控制等方面做了研究^[26-29],其中大都以泥面下 6 倍

桩径处嵌固端等效桩土间相互作用或以静力 $p-y$ 曲线法或 m 法模拟桩土间相互作用。张兆德等^[30]对一座海洋平台改造前和改造后各种工况进行了结构强度计算,对摩擦桩与平台主体之间不同连接方式进行了比较,分析了考虑风冰载荷下发生桩靴滑移德应力变化情况,为该平台的改造与工作状态下的强度安全评估提供了重要的参考。吴晓源等^[31]利用有限元方法对“航工平 1”抛石整平平台进行了强度分析,分析了平台在作业和自存状态下的结构内力和位移,并根据规范作了校核。李林普等^[32]以“南海一号”为例,提供了一个估算在随机波浪力作用下平台结构疲劳寿命的实用可行分析方法,编制了相应的计算程序,对我国海洋平台机构的可靠性分析具有一定的实际意义。中科院力学所的申仲翰等^[33]针对钢结构海洋平台整体安全问题,采用多级评估原理,将平台的承载能力和结果作了综合研究。秦太验等^[34]采用有限元方法,建立了有失真性变形与凹坑耦合损伤桩腿的等效梁和管单元刚度矩阵的计算方法。王立忠等^[35]应用 ANASYS 软件建立起自升式平台和冰相互作用的数学仿真模型,对自升式平台进行了动力分析模型,并校核了平台桩腿的极限强度和疲劳强度。大理理工的邢金有等^[35]采用逐步破坏分析法计算一座老齡平台主体极限强度。

从上面可以看出,国内对海洋平台的风险评估的研究不是很多,与国外相比,虽然还是有一定的差距,但是国内对海洋平台的风险评估也开始重视起来了。中国船级社的段梦兰等人^[36]提出,我国海洋石油平台在未来可着重若干方面的研究,其中第一条就是老齡平台的风险评估与管理。

目前,我国海洋平台大多数服役年限都比较长,有些平台已经达到或超过了它们原来的设计寿命,正步入其后服役期。这些老齡平台的许多构件已不同程度地出现了疲劳裂纹,结构老化严重。随着我国海上油气田的不断发现,以及国家对海洋石油资源的迫切需求,海洋石油的勘探和开发规模越来越大。但是由于国家财力的制约,对钻井装备的投资受到极大限制,在短期内不可能购置或生产新的钻井平台。因此必须对现有平台进行挖潜,延长在役平台的使用年限成为一项非常紧迫和具有全局战略性及重要意义的任务。对这些老齡平台来说,继续服役的最大问题就是安全的问题。必须尽快解决如何可以在继续产生经济效益的前提下,而又使平台的安全得到保障。这就需要现有的平台进行一个综合而全面的安全评估工作,对平台的使用提供一个科学的依据,使平台的操作者可以对平台的安全状况有一个比较全面的认识。通过安全评估,识别出平台的主要风险,并按轻重缓急排出顺序,有助于管理者将注意力集中在风险最大的领域,使得维修决策和其它决策活动更为合理。在未来的作业中就可以对主要的风险进行监督,并采取具体的措施降低风险,使平台在安全的状况下作业,有效的减少事故的发生,而事故的减少就意味着效益的提高。

1.3 本文主要工作

本文主要研究工作如下:

(1) 阅读图纸等平台基础资料,如:操船手册、平台结构图纸、工作海区的环境资料等,并根据这些相关的资料采用有限元软件 Patran 建立平台结构的整体有限元模型,并将平台结构的自身质量、设备及人员的质量离散到单元节点上,建立质量模型。

(2) 计算平台重力载荷、波浪载荷、风载等;根据给定的平台工作海区环境资料,参照平台设

计规范的有关内容, 给出各种载荷工况及其组合工况。

(3) 应用有限元软件 ABAQUS 计算平台自存和作业两种状态下的应力分布, 针对上面确定每一种计算工况, 逐一进行求解, 并对平台抗倾覆进行了分析。

(4) 处理和分析计算的结果, 将计算结果以图形、数据表格的形式表达出来, 并对其进行分析, 为工程实际提供理论依据。

第二章 有限元方法原理和应用软件

大型高速计算机的出现使得大规模的三维结构强度的数值分析方法成为可能，而在工程实际中一般都是以有限元分析法作为基础和前提的。有限元模型建立的好坏、分析方法的正确与否，将直接影响到强度计算的正确性和精确性。

平台总体结构强度有限元分析，就是首先将整个平台结构离散为功能与原结构相当的有限元模型，按照实际的结构情况划分节点和单元，然后把全部载荷等效为节点载荷作用在节点上，而节点由单元的刚度支持，进而计算节点的位移和应力，最后算出单元应力而得到平台整体结构的应力状况和整体变形情况。

2.1 有限元方法原理简介

有限元是那些集合在一起能够表示实际连续域的离散单元。有限元的概念早在几个世纪前就已产生并得到了应用，例如多边形（有限个直线单元）逼近圆来求得圆的周长，但作为一种方法而被提出，则是最近的事。有限元法最初被称为矩阵近似方法，应用于航空器的结构强度计算，并由于其方便性，实用性和有效性而引起从事力学的科学家的浓厚兴趣。经过短短数十年的努力，随着计算机技术的快速发展和普及，有限元方法迅速从结构工程强度分析计算扩展到几乎所有的科学技术领域，成为一种丰富多彩，应用广泛并且实用高效的数值分析方法。

对于不同物理性质和数学模型的问题，有限元求解法的基本步骤是相同的，只是具体公式推导和运算求解不同。有限元求解问题的基本步骤通常为：

第一步：问题及求解域定义：根据实际问题近似确定求解域的物理性质和几何区域。

第二步：将解域离散化：将求解域近似为具有不同有限大小和形状且通过单元节点彼此相连的有限个单元组成的离散域，习惯上称为有限元网格划分。显然单元越小（网格越细）则离散域的近似程度越好，计算结果也越精确，但计算量及误差都将增大，因此求解域的离散化是有限元法的核心技术之一。

第三步：确定状态变量及控制方法：一个具体的物理问题通常可以用一组包含问题状态变量边界条件的微分方程式表示，为适合有限元求解，通常将微分方程化为等价的泛函形式。

第四步：单元推导：对单元构造一个适合的近似解，即推导有限单元的列式，其中包括选择合理的单元坐标系，建立单元试函数，以某种方法给出单元各状态变量的离散关系，从而形成单元刚度矩阵。为保证问题求解的收敛性，单元推导有许多原则要遵循。对工程应用而言，重要的是应注意每一种单元的解题性能与约束。例如，单元形状应以规则为好，畸形时不仅精度低，而且有缺秩的危险，将导致无法求解。

第五步：组装求解：将单元总装形成离散域的总矩阵方程（联合方程组），反映对近似求解域的离散域的要求，即单元函数的连续性要满足一定的连续条件。组装是在相邻单元节点进行，状态变量及其导数连续性建立在节点处。

第六步：联立方程组求解和结果解释：有限元法最终形成联立方程组。联立方程组的求解可用直接法，迭代法等。求解结果是单元节点处状态变量的近似值。对于计算结果的质量，将通过

与设计准则提供的允许值比较来评价并确定是否需要重复计算。

简言之，有限元分析可分成三个阶段：前处理，求解和后处理。前处理是建立有限元模型，完成单元网格划分；后处理则是求解后分析结果，使用户能方便提取信息，了解计算结果。

有限元分析的目的是为了模拟结构在载荷系统作用下的行为，而不仅仅是结构的几何特征。而且，结构在载荷作用下的行为受几何模型细节的影响程度会因研究问题的不同而不同。结构在载荷作用下的行为受很多方面因素的影响，如结构几何形状，载荷的分布，载荷的大小，相邻结构间的相互作用等等。在模拟结构承载后的行为时，需要对所有这些因素作适当简化，而整个有限元分析的精度又依赖于对这些不确定因素进行简化的正确程度。因而结构简化是影响有限元分析精度的一个重要环节。

虽然目前的计算机已经有能力分析大型复杂的有限元模型，但是在大多数结构有限元分析中，考虑到尽量节省人力，物力，一般仍需对结构进行简化。通常而言，结构允许简化的程度依赖于计算要求的精度以及现有各种资源的可利用程度。当然，结构简化并不是有限元分析所独有的。在运用传统解析方法分析结构应力时，结构支撑和载荷条件很少有完全与该解析公式条件相吻合的情况，通常须作适当简化。与传统解析方法相比，有限元法最大的优点就在于，对于一些复杂结构问题的求解，它只需作较少的简化，分析问题大为方便。

有限单元法的基本思想是将连续的求解区域离散成一组有限个，且按一定方式相互连接在一起的单元的组合物，由于单元能按不同的联结方式进行组合，且单元本身又可以有不同形状，因此可以模型化几何形状复杂的求解区域。有限单元法作为数值分析方法的另外一个重要特点是利用每一个单元内假设的近似函数来分片的表示全求解域待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个节点的数值和其插值函数来表达。这样一来，一个问题的有限元分析中，未知函数或其导数在各个节点上的数值就成为新的未知量（也就是自由度），从而使一个无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求出这些未知量，就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值，从而得到整个求解域上的近似解。显然随着单元数目的增加，也即单元尺寸的缩小，或者随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高，解的近似程度将不断改进，如果单元是满足收敛要求的，近似解将最后收敛于近似解。

三十多年来，有限单元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题，板壳问题，由静力平衡问题扩展到稳定问题，动力问题和波动问题。分析的对象从弹性材料扩展到塑性，粘弹性，粘塑性和复合材料等，从固体力学扩展到流体力学，传热学等连续介质力学领域。在工程分析中的作用已从分析和校核扩展到优化设计并和计算机辅助设计技术相结合。可以预计，随着现代力学，计算数学和计算机技术等学科的发展，有限单元法作为一个具有巩固理论基础和广泛应用效力的数值分析工具，必将在国民经济建设和科学技术发展中发挥更大的作用，其自身也将得到进一步的发展和完善^[37]。

2.2 本文使用的主要软件和方法

2.2.1 使用的主要软件

本文采用国际上权威的有限元通用软件 Patran 和 ABAQUS，前处理建模部分使用有限元软

件 Patran, 而后处理计算部分使用 ABAQUS。

2.2.2 过程分析流程

MSC.Software 公司^[38]是世界著名的有限元分析和计算机仿真预测应用软件 (CAE) 供应商之一, 其所能提供的产品从专为设计工程师校核设计概念而开发的桌面级设计工具, 到可以完成各类大型复杂工程分析的企业级软件平台, 产品的应用范围十分广泛, 包括航空、航天、汽车、船舶、电子、核能等, 涉及内容包括结构设计、静态分析、动态分析、热传导分析、疲劳、运动模拟等, 其产品为世界众多著名大公司使用。

Patran 是一个集成的并行框架式有限元前后处理及分析仿真系统。MSC.Patran 最早由美国宇航局(NASA)倡导开发, 是工业领域最著名的并行框架式有限元前后处理及分析系统, 其开放式、多功能的体系结构可将工程设计、工程分析、结果评估、用户化设计和交互图形界面集于一身, 构成一个完整的 CAE 集成环节。

MSC.Patran 的一般使用流程, 归纳起来如图 2.1 示。

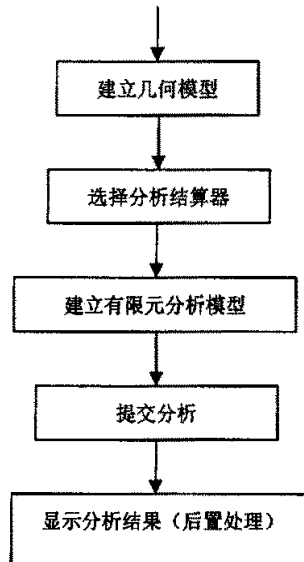


图 2.1 MSC.Patran 的一般使用流程

ABAQUS^[39]是美国 HKS 公司 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.) 推出的、目前国际上最权威的大型非线性有限元计算软件, 目的是对固体和结构的力学问题进行数值计算分析。它可以进行结构的静态和动态分析, 如应力、变形、振动、冲击、热传导和对流、质量扩散、声波、力电耦合分析等; 它具有丰富的单元模式, 在它的单元库中有 500 以上的单元, 如杆、梁、刚架、板壳、实体、无限体元等; 可以模拟广泛的材料性能, 如金属、橡胶、塑料、钢筋混凝土、弹性泡沫、岩石和土壤等。ABAQUS 有两个主要的分析模块: ABAQUS/Standard 提供了通用的分析能力, 如应力和变形、热交换、质量传递等; ABAQUS/Explicit 应用对时间进行显式积分的动态模拟, 提供了应力/变形分析的能力。ABAQUS/Post 提供了对力学模型和计算结果的后处理功能, 绘图、动画、x-y 平面绘图、时间历程绘图等。软件系统还包括其他的几个部分, 如 ABAQUS/Aqua

和 ABAQUS/USA 模块。ABAQUS 的优点在于其解决非线性的能力很强大，本构模型比较多，更为重要的是有我们所需要的海工模块 ABAQUS/Aqua 这一扩展模块。

ABAQUS/Aqua 模块扩展了 ABAQUS/Standard 的功能，它的一系列功能可以附加在 ABAQUS/Standard 上应用。其目的是模拟海上结构，例如海洋石油平台、深水下的升降器和管道系统。其中某些功能包括模拟波浪、风载荷及浮力等的影响。Aqua 可以用于静态和动态计算，在计算中，流体速度假设由两部分迭加而成：随位置和高度而变化的稳定流、重力波。流体颗粒的加速度只与重力波有关系。流体颗粒的速度和加速度用来计算沉浸物的拖曳力和惯性力。

在使用 Aqua 时，必须定义坐标系的方向。对于三维情形下 z 坐标轴必须是垂直方向，二维情形下 y 坐标必须为垂直指向。三维情况下的静水面位于与 x-y 平面平行的平面上。对二维情形与 x 轴平行。Aqua 波浪载荷需要定义流体密度，海床和静水面的位置以及重力加速度。所有这些流体的参数必须在 *Aqua 选项的第一行中给出。定义稳态流时是通过给出与位置和高度相关的流速来定义，这些是在 Aqua 选项的第二行中给出。对三维模型的高度是在 z 轴正向定义的，二维模型则是 y 轴的正向。二维情形流速的 z 方向的分量可以忽略掉。

通常，Morison 方程用于计算在规则作用下的小尺度海洋结构物的荷载，作为确定性问题处理，对于实际出现的不规则波浪，可以应用海况统计特征的长期分布规律，确定某种概率意义下的极端波浪——设计波作为流场计算的依据^[49]。Morison 方程是 Morison 等人于 1950 年在模型试验的基础上经过大量计算提出的计算垂直于海底的刚性柱体上的波浪载荷公式^[49]。计算由波浪、海流引起的对平台的作用力时，只要引用 ABAQUS/Aqua 模块，力的计算就可以由程序来自动完成。

采用有限元软件 Patran 和 ABAQUS 来处理实际工程问题，主要过程分析流程如图 2.2 所示。

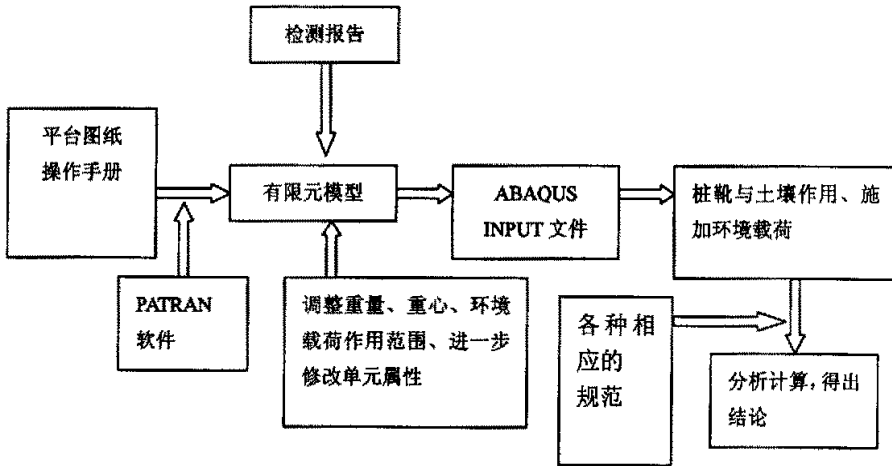


图 2.2 过程分析流程图

2.3 本章小结

本章介绍了有限元方法的基本原理、本文的整体分析流程以及本文主要使用的有限元分析软件 Patran 和 ABAQUS 的一些基本概况、我们使用的一些主要功能和其中一些基本理论概念。

第三章 整体结构三维有限元模型

本章在总结以往对海洋平台安全评估经验的基础上，利用有限元软件 Patran 建立了能真实反映该平台结构状况的有限元模型，该模型能准确地反映决定平台安全的桩靴及土壤的相互作用情况，进而能更加精确地计算桩腿的强度极限。为进一步反映平台桩腿与海床的相互作用，利用 ABAQUS 独有的技术，发展了三维铰单元，解决了以前用经验的 3 倍桩径做法带来的可能偏差。

3.1 平台结构总体概况及主尺度

“南海一号”自升式钻井平台于 1976 年建造于新加坡罗宾船厂，为罗布雷 300 型自升式生产平台。目前“南海一号”作业海域水深 17 米，气隙在 18 米左右，根据作业要求，要托航到渤海湾地区钻井作业，而蓬莱 19-3 油田所属海域水深 24-27 米，导管架平台泥线以上高度为 57 米，“南海一号”要适应导管架的高度进行作业，升船高度必须要控制在 50-53 米，气隙要控制在 26 米左右。操作手册规定最大气隙为 24 米，因此需要对超过 24 米气隙状态下，平台作业的安全性、适应性进行分析。平台气隙变化如图 3.1 所示。

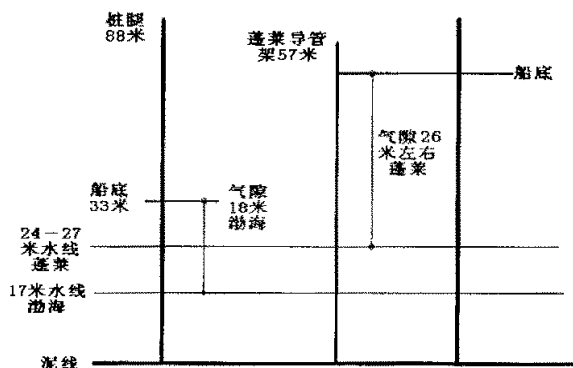


图 3.1 南海一号目前作业海域与将来海域气隙图

平台由上部模块（包括船体）、桩腿桩靴、升降机构组成。平台由下而上依次为底甲板、机械甲板和主甲板。平台底甲板主要承受预压载、钻井水、燃油等液舱的重量，机械甲板位于三个升降室之间，其上主要有泥浆泵、泥浆池、发电机组、整流装置等设备。主甲板首端有直升机平台和生活区，中部为管道堆场，尾部为悬臂梁装置。三根截面为等边三角形的桁架腿安装在三个近似三角形桩孔中。桩腿为空间桁架结构，由竖向齿轮、横向撑杆和斜撑组成，底部为倒锥体的桩靴，桩靴直径为 16.4592 米。平台和桩腿之间通过齿轮齿条连接来传递纵向载荷，另外平台升降室壁有导向装置来横向固定平台与桩腿。平台主体及桩腿所用钢材均为高强度钢。船体结构板材屈服强度为 235MPa，骨材型材屈服强度为 360MPa，桩腿屈服强度为 689MPa。下面是平台的主尺度：

平台长度：64.9224m

平台宽度: 64.6176m
型深: 8.2296m
吃水: 4.5720m
直升机重量: 9.2988t
桩腿数目: 3
桩腿长: 88.6968m
桩腿直径: 10.6680m
桩靴直径: 16.4592m
桩靴入泥深度: 3.2766m
桩靴承载面积: 202.3362m²

3.2 平台结构的模拟

3.2.1 坐标系

坐标原点取在平台底甲板首部和平台中心线的交点处, 其中
X 轴为首尾方向, 向尾为正;
Y 轴为左右方向, 向右为正;
Z 轴为上下方向, 向上为正。

3.2.2 特殊处理

为了更好的模拟平台实际结构, 本文采用了以下特殊处理:

- 桩靴模拟~三维铰单元
- 齿轮-齿条传动机构的模拟~约束转动自由度
- 板单元和梁单元重叠问题~OFFSET 命令
- 设备、活载等~质量单元

(1) 为正确模拟桩靴与海床之间的相互作用, 本文采用三维的铰单元, 其适用条件为:

只能与 ABAQUS/Aqua 一同使用; 专门用来模拟桩靴和地层之间的相互作用; 对于小变形和扭转有效; 纯弹性或者弹塑性。在本文中取: 桩靴入泥深度 3.2766 米, 桩靴直径 16.4592 米, 土壤垂向弹性剪切模量: 5.14E10, 土壤水平弹性剪切模量: 3.87E10, 土壤扭转弹性剪切模量: 2.04E10, 扭转刚度: 4E10。

(2) 齿轮-齿条传动机构的模拟~约束转动自由度

桩腿和船体的连接实际为齿轮齿条系统, 齿轮齿条约束了相应部位的转动, 从而实现桩腿的上下运动。计算中采用 36 根三维梁单元来实现这一目标。在梁单元中与船体相连节点约束了三个方向的转动。

(3) 板单元和梁单元重叠问题~OFFSET 命令

本论文采用 Patran 软件模拟平台结构，并建立有限元模型。平台为典型的空间板梁结构，平台板材用板单元模拟，纵桁、纵骨、横梁、强横梁、扶强材、舷侧箱型梁等梁类构件用梁单元模拟。在有限元模型中，对于板梁结构，在平台的几何模型中，绝大多数都是梁结构或加强筋附着在板壳表面的结构。在使用 ABAQUS 建立有限元模型的过程中，梁或钢筋用一维梁单元表示，板材用二维的板单元表示。当梁单元用于板单元的加强作用时，通常他们享用同一个节点。梁单元的节点在其截面的某个位置上，板单元的节点在壳的中性面上。因此，如果梁单元和板单元享用同一个节点时，壳结构和梁结构之间形成了重叠。因此，为了真实的反映梁和壳的接触关系，我们需要采用 offset 命令。如图 3.2 所示，应用 offset 的命令，可以控制梁单元和板单元之间的间隙，从而真实有效的模拟平台结构的实际情况。

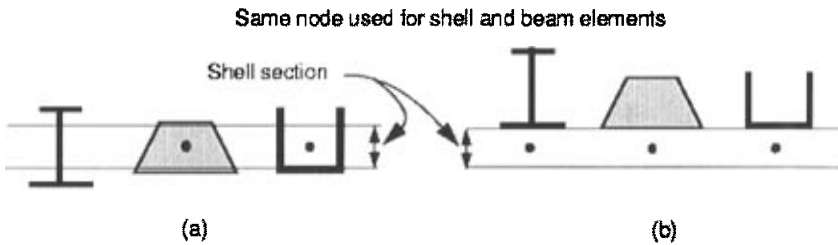


图 3.2 OFFSET 命令使用前后的差异

(4) 设备、活载等~质量单元

由于附属结构对平台主体结构的强度没有明显贡献，但会增加平台负荷，因此在建模时多数附属结构没有进行详细的结构模拟，而是采用质量单元来模拟这些结构的重量和惯性力。

为使计算模型与实际结构尽量相似以使计算结果反映平台实际受力状态，将平台结构主要受力构件都按照实际尺寸和布置情况建立计算模型。具体包括以下结构：

- 生活模块
- 桩腿结构
- 桩靴结构
- 悬臂梁结构
- 船体甲板
- 船体舷侧板
- 横、纵舱壁
- 纵骨、纵桁
- 横梁、强横梁
- 齿轮、齿条啮合结构

模型共有 27699 个节点，共有 62413 个单元，其中：7384 个质量单元，22726 个四边形板单元，1104 个三角形板单元，31196 个梁单元，3 个铰单元。通过平台模型重量及重心与平台实际重量及重心的比较，表明本次建立的有限元模型与实际情况基本吻合。

3.3 有限元模型

3.3.1 平台实际照片和整体有限元模型



图 3.3 平台的实景照片

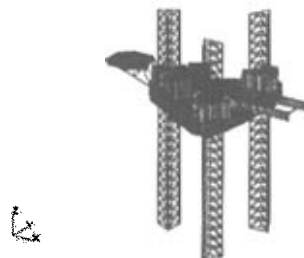


图 3.4 平台整体结构有限元模型

3.3.2 船体及上部结构



图 3.5 船体及上部结构

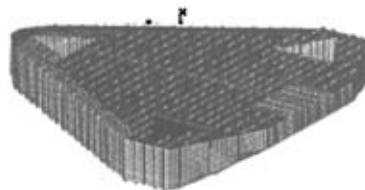


图 3.6 船体外壳结构

3.3.3 船体甲板、舷侧以及其它主要结构

船体主甲板、机械甲板、底甲板、舷侧板材用 SHELL 单元模拟，各种骨材、扶强材等用梁单元模拟。模型细节，包括船体主甲板、机械甲板、底甲板、舷侧、桩腿、悬臂梁、舱室内部结构、生活模块、直升机甲板等如图 3.7-3.15 所示。

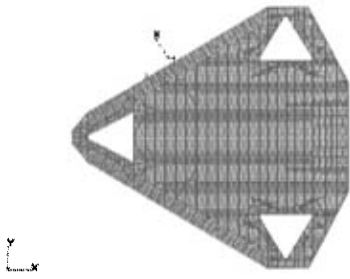


图 3.7 船体主甲板有限元模型

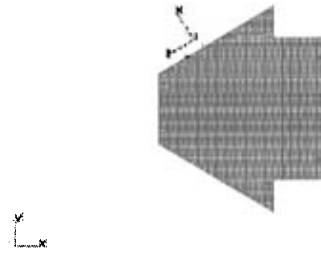


图 3.8 船体机械甲板

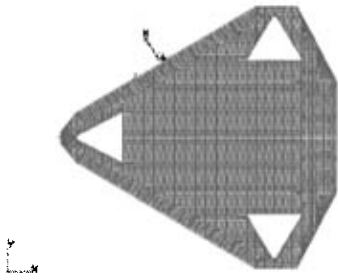


图 3.9 船体底甲板

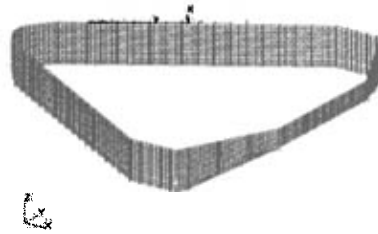


图 3.10 舷侧

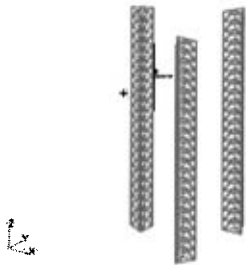


图 3.11 桩腿有限元模型



图 3.12 悬臂梁

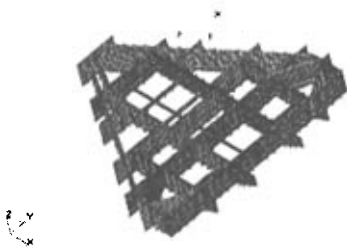


图 3.13 舱室结构

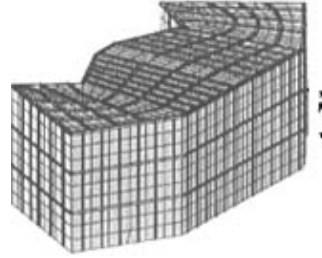


图 3.14 生活模块

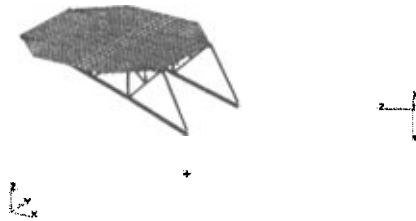


图 3.15 直升机甲板

3.4 载荷模拟

3.4.1 功能载荷

(1) 固定荷载：固定荷载、浮力以及附属结构、海生物引起的荷载由 ABAQUS 程序自动计算。

(2) 上部甲板荷载：上部甲板荷载包括：结构自重、设备重量、活载。模型中包含的结构设备重量由程序自动计算，省略的结构设备重量用质量单元模拟。由于平台实际重量与模型重量会有一定差异，其差值用质量单元找齐，以保证模型重量与平台实际重量一致。

3.4.2 环境载荷

(1) 风荷载：风载由 ABAQUS/AQUA 模块按规范的计算方法自动计算，需要给出风速、风向、迎风面积等参数。

(2) 波浪荷载：波浪荷载由 ABAQUS/AQUA 模块按 Morison 公式自动计算，需要提供波高、周期、波速、浪向等参数。

(3) 流荷载：由 ABAQUS/AQUA 模块自动计算，需要给出表层和底层流速。

3.5 海生物

“南海一号”为移动平台，海生物很少，将海生物厚度定为：水面以下结构 5cm，飞溅区 10cm。

3.6 结构固有频率及振型

以前在对自升式平台的强度分析过程中,由于当时计算条件的限制,未能考虑桩靴和土壤的相互作用,导致平台的刚度偏大;而本文采用 ABAQUS 软件中特有的铰单元来模拟桩靴与土壤的相互作用,计算频率更接近实际情况。

我们对平台结构进行了分析,计算了结构固有频率和振型,在此取前三阶,固有频率如表 3.1 所示,自存状态和作业状态下的前三阶振型如图 3.16-3.21 所示。

表 3.1 平台结构固有频率

固有频率	作业状态(Hz)	自存状态(Hz)
1	0.23785	0.24021
2	0.24239	0.24508
3	0.63979	0.77939

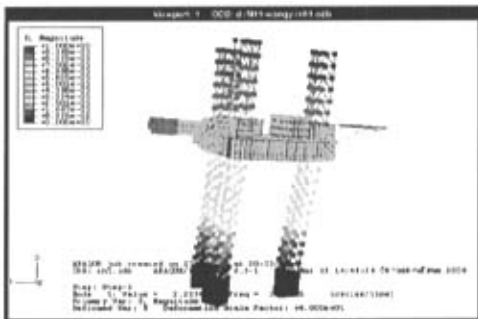


图 3.16 作业状态一阶振型

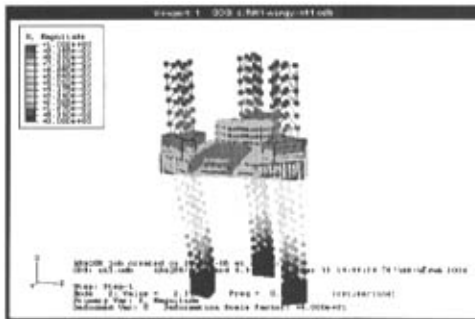


图 3.17 作业状态二阶振型

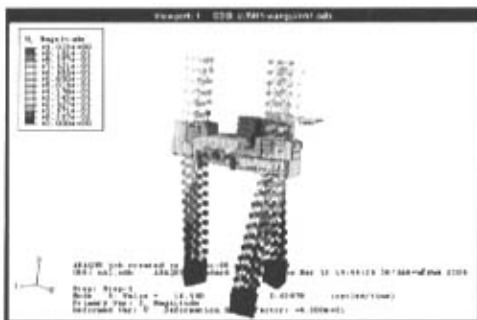


图 3.18 作业状态三阶振型

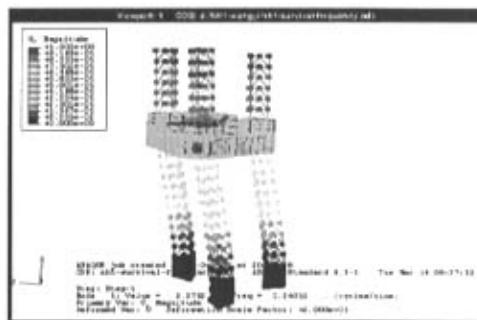


图 3.19 自存状态一阶振型

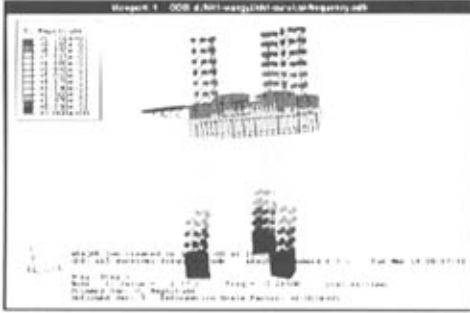


图 3.20 自存状态二阶振型

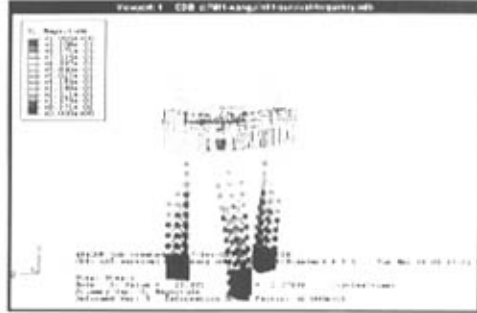


图 3.21 自存状态三阶振型

3.8 本章小结

- (1) 采用 Patran 软件根据平台设计、历次改造图纸、操作手册等资料建立了与平台实际结构相当的有限元整体结构模型；
- (2) 得到了平台在自存、作业两种状态下的固有频率及相应振型，为后续的分析计算创造了条件；
- (3) 利用 ABAQUS 软件独有的铰单元，更加精确的模拟了桩靴与土壤的相互作用，使计算结果能更真实的反映平台实际结构状况。

第四章 计算载荷工况及其组合

4.1 结构载荷

4.1.1 桩腿载荷

桩腿部分载荷由以下两部分组成:

(1) 桩腿重量、所受到浮力及波浪力, 由计算程序自动生成, 其中包括海生物重量及受到的浮力;

(2) 对于一部分未建立计算模型的构件, 如梁单元、牺牲阳极块、肘板等其重量用质量单元施加于结构相应节点上。

4.1.2 上部甲板载荷

上部结构载荷包括输入计算模型受力构件的自重(由计算程序生成)、未建立模型构件的重量、甲板设备操作重量、甲板活载荷等用质量单元施加于结构相应节点上。

4.1.3 液体可变载荷

液体可变载包括燃油、淡水、钻井水以及各种杂项等等。

4.1.4 大钩载荷

大钩载荷 453.6 吨, 以集中载荷的形式施加于悬臂梁井架固定部位的相应位置。

4.1.5 环境载荷

(1) 环境载荷设计衡准

本文对正常作业状态环境载荷选取一年一遇风浪流作为校核条件, 对风暴自存状态选取百年一遇风浪流作为校核条件。

(2) 风载荷

$$\textcircled{1} \text{计算公式: } F = KK_z P_0 A \quad (4-1)$$

式中: P_0 —风压, $P_0 = 0.613 V^2$;

A —受风构件的迎风投影面积;

K_z —受风构件高度系数;

K —受风构件形状系数;

V —设计风速。

②受风面积计算

对底甲板以上构件和模块的风载荷, 本文定义相应的受风面积和受力节点。根据各个方向的受风面积, 分配给相应的节点, 对该部分模型构件不再重复计算其风载荷, 而定义其风载荷形状系数为 0; 对下甲板以下至水面以上构件的受风面积, 由程序自动按照构件截面形状, 确定其高度系数和形状系数并形成风载荷直接作用于构件上。

③最大风速

最大风速的选取如下：

表 4.1 计算风速

项目	风速
风暴自存状态（百年一遇）	51.4 m/s
作业状态（一年一遇）	35.97 m/s

(3) 波浪、流载荷

①计算公式

按波浪理论，由于平台桩腿等水下结构对波浪而言属于小尺度圆形构件，故本文采用 Morison

公式计算波浪对构件产生的作用力：
$$F = 0.5C_D\rho Du|\mu| + C_M\rho V_0\dot{u} \quad (4-2)$$

F—单位长度桩柱受到的波浪载荷，kN/m；

C_D —阻力系数；

C_M —惯性力系数；

ρ —流体密度，kg/m³；

u—与桩柱正交的流体速度，m/s；

D—单位长度桩柱在垂直于 u 方向的投影面积，m²；

V_0 —单位长度桩柱的体积，m³；

\dot{u} —与桩柱正交的相对加速度，m/s²。

Morison 公式计算波浪力时，波速考虑海流的矢量叠加，假设海流沿水深呈线性分布。计算波浪力时考虑海生物的影响：即考虑海生物对水下构件尺度和粗糙度的增加和对阻力系数和惯性系数的影响。

②计算水深

表 4.2 计算水深

作业条件	自存条件
27m	27m

③波浪、流参数

在进行结构静强度计算时假设波浪、流各向均匀分布，具体参数如下：：

表 4.3 波浪与水流参数

项目	作业条件	自存条件
最大波高	12 m	12 m
表层流速	1.27 m/s	1.62 m/s
波浪周期	10.4s	10.4s

④阻力系数 (C_D) 与惯性力系数 (C_M)

按照规范有关规定，圆截面单元的 C_D 和 C_M 选取如下：

表 4.4 阻力和惯性力系数的选择

系数	干净构件	附着海生物
C_D	0.65	1.05
C_M	1.60	1.20

(4) 波浪、流与风载荷组合

对波浪、流与风载荷进行工况组合时，按表 4.5 进行：

表 4.5 风、浪、流的组合

平台状态	方向 (与 X 轴交角)	水深 (m)	波浪、流、风组合原则
百年一遇	0°	27	最大波高+相应流速+最大风速
	58°	27	
	90°	27	
	180°	27	
一年一遇	0°	27	最大流速+相应波高+最大风速
	58°	27	
	90°	27	
	180°	27	

(5) 海生物

海生物将导致水下构件几何尺度和阻力系数、惯性力系数的增大，使其承受较大的波浪载荷。由于平台属于移动平台，海生物不严重，按规范要求取海生物厚度：水面以下构件为 5cm，飞溅区构件为 10cm。本文将海生物比重取为 13.72KN/m^3 。

4.2 计算载荷工况及其组合

4.2.1 环境载荷选取原则

按规范有关原则，计算载荷选取的基本原则为：

- (1) 以百年一遇海洋环境条件作为平台风暴自存状态校核环境条件
- (2) 以一年一遇海洋环境条件作为平台作业状态校核环境条件

4.2.2 荷载组合原则

对平台作业载荷和海洋环境载荷组合，按以下原则进行：

- (1) 作业环境载荷+固定载荷+正常作业状态最大活载荷
- (2) 极限风暴环境载荷+固定载荷+自存状态最大活载荷

4.2.3 环境载荷方向选取

考虑结构的对称性，本计算校核共选取 0°、58°、90°、180°共 4 个浪向海洋环境载荷校核平台强度，如图 4.1 所示。

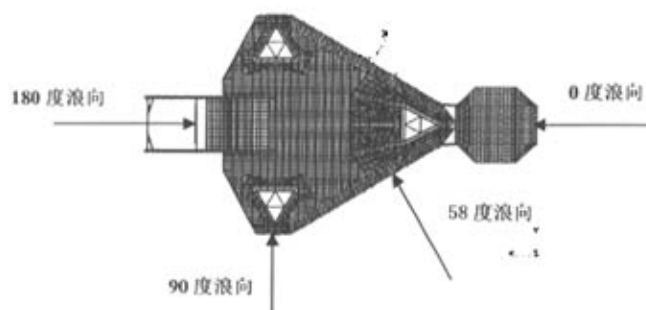


图 4.1 浪向示意图

4.2.4 基本计算工况

南海一号平台的各种基本计算工况如表 4.6 所示。

表 4.6 基本工况

工况号	项目
1	平台结构及设备
2	液体可变载荷
3	固体可变载荷
4	吊机载荷
5	大钩载荷
6	直升机电荷
7	压载水
8	百年一遇波浪+流+风 (0°)
9	百年一遇波浪+流+风 (58°)
10	百年一遇波浪+流+风 (90°)
11	百年一遇波浪+流+风 (180°)
12	一年一遇波浪+流+风 (0°)
13	一年一遇波浪+流+风 (58°)
14	一年一遇波浪+流+风 (90°)
15	一年一遇波浪+流+风 (180°)

4.2.5 组合工况

自存状态和作业状态下基本工况的组合工况见表 4.7。

表 4.7 组合工况

平台状态	工况序号	工况组合内容
自存状态	16	1+2+3+7+8
	17	1+2+3+7+9
	18	1+2+3+7+10
	19	1+2+3+7+11
	20	1+2+3+4+5+7+12
作业状态	21	1+2+3+4+5+6++7+13
	22	1+2+3+4+5+6++7+14
	23	1+2+3+4+5+6++7+15

4.3 本章小结

- (1) 本章对风、浪、流等载荷的计算原理、计算参数的选择进行了论述，并确定环境载荷相关计算参数；
- (2) 列出了基本工况并确定平台在自存、作业状态下的各种组合工况。

第五章 平台风暴自存状态分析

5.1 概述

平台自存条件下的强度分析属于静力分析的一种,100年重现期的环境事件被选为分析条件。

5.1.1 自存状态平台负荷

自存状态平台负荷见表 5.1。

表 5.1 自存状态平台负荷明细

名称	重量(吨)
平台结构及设备	5836.83
液体可变载荷	296.33
固体可变载荷	882.8
压载载荷	0.04536
大钩平均载荷	0
桩腿及桩靴	1820.21
总计	8836.22

5.1.2 环境条件

(1) 环境参数:

① 水深: 27m

② 浪: 在这里根据对称性, 选取了 4 个浪向: 0 度, 58 度, 90 度, 180 度, 波高和周期见表 5.2 所示。

表 5.2 波高 (m) 和周期 (s)

H_{max}	12
T_m	10.4

其中: H_{max} --- 最大波高

T_m ---- 最大波高对应的周期。

③ 流: 表层和表层以下 15.24m 的流速见表 5.3。

表 5.3 流速 (m/s)

表层	1.62
表层以下 15.24 米	0.89

④ 风: 在海面上 10 米高程处每分钟风速为 51.4m/s。

(2) 海生物

自存状态下海生物在水下和飞溅区的厚度如表 5.4 所示。

表 5.4 海生物

	海生物厚度
水下构件	5cm
飞溅区构件	10cm

密度: 1.372t/m³;

5.2 计算工况

自存状态下各种计算工况详见第四章。

5.3 计算结果

根据中国船级社规范^[42], 在静载荷和环境载荷共同作用下, 平台强度按等单向应力及等效应力分别校核: 许用应力=屈服强度×许用应力系数。见表 5.5。

表 5.5 自存状态下许用应力系数

采用规范	应力种类	许用应力系数值
ABS	压应力	0.8
	剪切应力	0.532
CCS	等效应力	0.85

通过计算分析, 得出了自存状态下平台的整体应力分布, 如图 5.1 所示, 从图中可以看出自存状态下高应力区域为桩腿及船体结构的骨材。

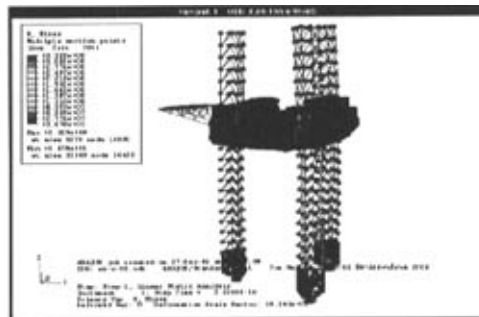


图 5.1 自存状态下平台整体应力分布

5.3.1 自存状态桩腿最大位移和应力

通过计算分析, 得出了自存状态下桩腿的最大位移, 最大等效应力和桩腿高应力单元, 如表 5.6, 5.7 和 5.8 所示, 可以看出自存状态下, 当浪向为 90 度时, 桩腿应力达到最大值为 332.9MPa, 当浪向为 0 度时, 桩腿位移达到最大值为 10.85cm, 自存状态下平台桩腿位移图和应力图如图 5.2, 5.3 所示。

表 5.6 自存状态下桩腿的最大位移表

浪向	位移(cm)
0 度	10.85
58 度	10.53
90 度	10.2
180 度	9.707

表 5.7 自存状态下桩腿的最大等效应力表
(材料许用应力=689×0.85=585.7MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	332	0.5668
58 度	332.6	0.5679
90 度	332.9	0.5684
180 度	332.7	0.5680

表 5.8 自存状态 90 度浪向桩腿高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
5270	3.33E+08	5.86E+08	0.5684	1.7593
5273	3.30E+08	5.86E+08	0.5641	1.7726
5276	3.26E+08	5.86E+08	0.5561	1.7981
5019	2.39E+08	5.86E+08	0.4085	2.4481
5018	2.38E+08	5.86E+08	0.4070	2.4569
5017	2.38E+08	5.86E+08	0.4056	2.4657
5016	2.37E+08	5.86E+08	0.4041	2.4744
5015	2.36E+08	5.86E+08	0.4027	2.4830
5014	2.35E+08	5.86E+08	0.4014	2.4915
1146	2.32E+08	5.86E+08	0.3968	2.5202
1145	2.32E+08	5.86E+08	0.3968	2.5203
1147	2.32E+08	5.86E+08	0.3968	2.5204
1144	2.32E+08	5.86E+08	0.3967	2.5206
1143	2.32E+08	5.86E+08	0.3967	2.5210

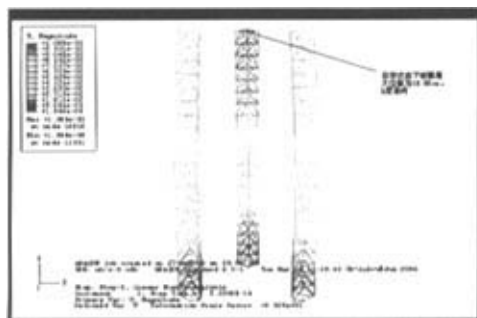


图 5.2 自存状态下平台桩腿位移图

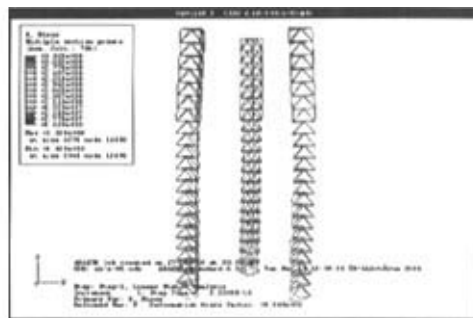


图 5.3 自存状态下平台桩腿应力图

根据 ABS 规范^[43]以及中国船级社规范^[44]，在静载荷和环境载荷共同作用下，平台自存状态最大应力校核如表 5.9:

表 5.9 自存状态桩腿梁单元最大应力校核

浪向 (度)	应力类别					
	压应力 ($0.8\sigma_s$)		剪切应力 ($0.532\sigma_s$)		等效应力 ($0.85\sigma_s$)	
	应力值 (MPa)	应力比	应力值 (MPa)	应力比	应力值 (MPa)	应力比
0	325.3	0.5902	4.978	0.0136	332	0.5668
58	325.7	0.5909	4.983	0.0136	332.6	0.5679
90	325.7	0.5909	4.983	0.0136	332.9	0.5684
180	324.8	0.5893	4.979	0.0136	332.7	0.5680

经过以上计算分析，可知自存状态下桩腿在四个浪向的应力相差不大，满足应力的许用范围，是安全的，由于平台气隙升高后，主要对桩腿产生比较大的影响，从上面的分析也可以看出，高应力区域也主要集中在平台的桩腿部分，经过上面的分析，桩腿的单向应力和等效应力均在合理的许用应力范围之内，满足平台的载荷要求。

5.3.2 自存状态主甲板应力分析

自存状态下主甲板板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 5.10, 5.11, 5.12 和 5.13 所示，自存状态下主甲板板单元应力分布和梁单元应力分布如图 5.4 和 5.5 所示。从中可以看出自存状态下主甲板板单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 68.6Mpa，梁单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 256.7Mpa。

表 5.10 自存状态下主甲板板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	平台现状	
	等效应力(MPa)	应力比
0 度	68.6	0.3434
58 度	67.9	0.3399
90 度	67.26	0.3367
180 度	66.5	0.3329

表 5.11 自存状态 0 度浪向主甲板板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
28203	6.86E+07	2.00E+08	0.3434	2.9120
55914	6.84E+07	2.00E+08	0.3425	2.9197
55658	5.41E+07	2.00E+08	0.2710	3.6900
26758	5.35E+07	2.00E+08	0.2679	3.7332
55027	5.18E+07	2.00E+08	0.2593	3.8563
7818	5.18E+07	2.00E+08	0.2593	3.8566
700	4.94E+07	2.00E+08	0.2471	4.0466
53453	4.93E+07	2.00E+08	0.2470	4.0484

55922	4.80E+07	2.00E+08	0.2403	4.1617
790	4.76E+07	2.00E+08	0.2385	4.1925
53543	4.76E+07	2.00E+08	0.2385	4.1937
53452	4.73E+07	2.00E+08	0.2367	4.2241
699	4.71E+07	2.00E+08	0.2359	4.2399
28211	4.70E+07	2.00E+08	0.2352	4.2521
762	4.68E+07	2.00E+08	0.2343	4.2675

表 5.12 自存状态下主甲板梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	平台现状	
	等效应力(MPa)	应力比
0 度	255.9	0.8363
58 度	255.7	0.8356
90 度	256.1	0.8369
180 度	256.7	0.8389

表 5.13 自存状态 180 度浪向主甲板梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
52997	2.57E+08	3.06E+08	0.8389	1.1920
244	2.49E+08	3.06E+08	0.8131	1.2299
306	2.40E+08	3.06E+08	0.7827	1.2776
53059	2.32E+08	3.06E+08	0.7593	1.3170
27959	2.17E+08	3.06E+08	0.7080	1.4124
27135	2.14E+08	3.06E+08	0.7002	1.4281
55797	2.14E+08	3.06E+08	0.7002	1.4281
55866	2.14E+08	3.06E+08	0.6987	1.4313
26987	2.08E+08	3.06E+08	0.6787	1.4734
55747	2.04E+08	3.06E+08	0.6680	1.4970
8148	2.02E+08	3.06E+08	0.6594	1.5165
55242	2.01E+08	3.06E+08	0.6582	1.5192
55744	1.90E+08	3.06E+08	0.6193	1.6146
26984	1.88E+08	3.06E+08	0.6132	1.6309
52998	1.84E+08	3.06E+08	0.6022	1.6605
245	1.84E+08	3.06E+08	0.6005	1.6653

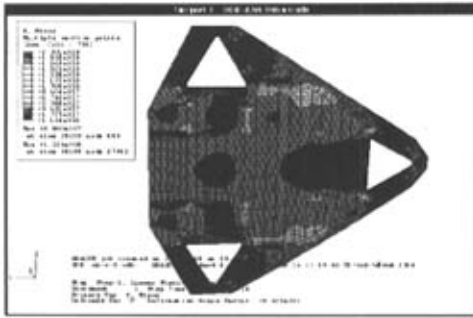


图 5.4 自存状态下主甲板板单元应力分布

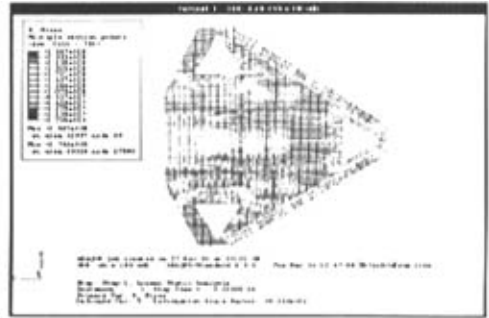


图 5.5 自存状态下主甲板梁单元应力分布

通过上面计算分析,可知自存状态下平台的主甲板梁单元应力相比较板单元要高,但二者均在合理安全系数以内,满足许用应力的要求。

5.3.3 自存状态机械甲板应力分析

自存状态下机械甲板板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 5.14, 5.15, 5.16 和 5.17 所示,自存状态下机械甲板板单元应力分布和梁单元应力分布如图 5.6 和 5.7 所示。从中可以看出自存状态下机械甲板板单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 48.36Mpa,梁单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 177.2Mpa。

表 5.14 自存状态下机械甲板板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	48.35	0.2421
58 度	48.35	0.2421
90 度	48.36	0.2421
180 度	48.4	0.2423

表 5.15 自存状态 180 度浪向机械甲板板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
57110	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57092	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57401	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
8838	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
8739	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57302	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57109	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57091	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57108	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
8529	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57303	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270

8740	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
57090	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270
8547	4.8401E+07	1.9975E+08	0.2423	4.1270

表 5.16 自存状态下机械甲板梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	平台现状	
	等效应力(MPa)	应力比
0度	177.2	0.5791
58度	177.1	0.5788
90度	177	0.5784
180度	177	0.5784

表 5.17 自存状态 0 度浪向机械甲板梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
9317	1.7719E+08	3.06E+08	0.5791	1.7269
57880	1.7606E+08	3.06E+08	0.5754	1.7380
9319	1.5891E+08	3.06E+08	0.5193	1.9256
57882	1.5858E+08	3.06E+08	0.5182	1.9296
57574	1.5606E+08	3.06E+08	0.5100	1.9608
9296	1.5580E+08	3.06E+08	0.5092	1.9640
8993	1.5221E+08	3.06E+08	0.4974	2.0104
57859	1.5131E+08	3.06E+08	0.4945	2.0223
57556	1.5084E+08	3.06E+08	0.4929	2.0287
57626	1.4934E+08	3.06E+08	0.4880	2.0490
8903	1.4797E+08	3.06E+08	0.4836	2.0680
8939	1.4784E+08	3.06E+08	0.4831	2.0699
57466	1.4767E+08	3.06E+08	0.4826	2.0721
57448	1.4742E+08	3.06E+08	0.4818	2.0756
8885	1.4740E+08	3.06E+08	0.4817	2.0760
57502	1.4680E+08	3.06E+08	0.4797	2.0845

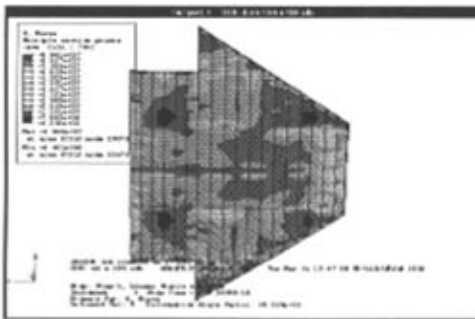


图 5.6 自存状态下机械甲板板单元应力分布

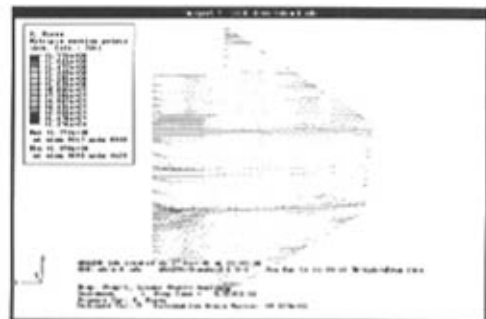


图 5.7 自存状态下机械甲板梁单元应力分布

自存状态下的机械甲板的应力不如主甲板的高，也满足许用应力的要求，满足合理的安全系数。

5.3.4 自存状态底甲板应力分析

自存状态下底甲板板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 5.18, 5.19, 5.20 和 5.21 所示，自存状态下底甲板板单元应力分布和梁单元应力分布如图 5.8 和 5.9 所示。从中可以看出自存状态下底甲板板单元最大等效应力在浪向为 58 度时达到最大值为 46.59Mpa，梁单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 122.6Mpa。

表 5.18 自存状态下底甲板板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	46.51	0.2328
58 度	46.59	0.2332
90 度	46.52	0.2329
180 度	46.21	0.2313

表 5.19 自存状态 58 度浪向底甲板板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
10611	4.6593E+07	1.9975E+08	0.2333	4.2871
37547	4.6247E+07	1.9975E+08	0.2315	4.3192
37548	4.3538E+07	1.9975E+08	0.2180	4.5879
10612	4.3537E+07	1.9975E+08	0.2180	4.5880
39434	4.3506E+07	1.9975E+08	0.2178	4.5913
13201	4.3099E+07	1.9975E+08	0.2158	4.6347
10629	4.3060E+07	1.9975E+08	0.2156	4.6389
37565	4.2900E+07	1.9975E+08	0.2148	4.6562
39422	4.2590E+07	1.9975E+08	0.2132	4.6900
13189	4.2184E+07	1.9975E+08	0.2112	4.7352
37549	4.0789E+07	1.9975E+08	0.2042	4.8972
37802	4.0657E+07	1.9975E+08	0.2035	4.9130
10867	4.0611E+07	1.9975E+08	0.2033	4.9187
37803	4.0610E+07	1.9975E+08	0.2033	4.9187

表 5.20 自存状态下底甲板梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	122.5	0.4003
58 度	122.5	0.4003
90 度	122.5	0.4003
180 度	122.6	0.4007

表 5.21 自存状态 180 度浪向底甲板梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
38238	1.2261E+08	3.0600E+08	0.4007	2.4958
38256	1.2129E+08	3.0600E+08	0.3964	2.5229
11320	1.2049E+08	3.0600E+08	0.3938	2.5396
11302	1.1950E+08	3.0600E+08	0.3905	2.5607
38376	1.1864E+08	3.0600E+08	0.3877	2.5793
11440	1.1780E+08	3.0600E+08	0.3850	2.5976
38366	1.1725E+08	3.0600E+08	0.3832	2.6099
11430	1.1667E+08	3.0600E+08	0.3813	2.6228
38239	1.1471E+08	3.0600E+08	0.3749	2.6677
11601	1.1378E+08	3.0600E+08	0.3718	2.6894
38537	1.1324E+08	3.0600E+08	0.3701	2.7022
11303	1.1235E+08	3.0600E+08	0.3671	2.7238
38268	1.1193E+08	3.0600E+08	0.3658	2.7338
11332	1.1163E+08	3.0600E+08	0.3648	2.7412
38280	1.1045E+08	3.0600E+08	0.3610	2.7704

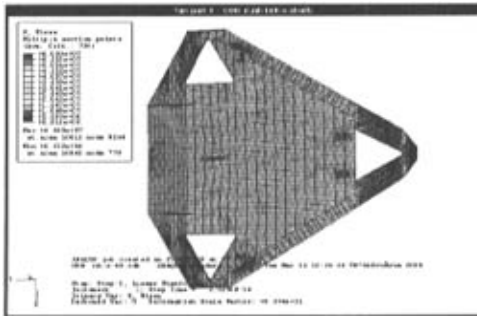


图 5.8 自存状态下底甲板板单元应力分布



图 5.9 自存状态下底甲板梁单元应力分布

自存状态下底甲板的应力类似于机械甲板，应力值跟机械甲板也相差不多，处于合理的许用应力范围之内，满足安全系数的要求。

5.3.5 自存状态舱壁应力分析

自存状态下舱壁板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 5.22, 5.23, 5.24 和 5.25 所示，自存状态下舱壁板单元应力分布和梁单元应力分布如图 5.10 和 5.11 所示。从中可以看出自存状态下舱壁板单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 150.1Mpa, 梁单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 175Mpa。

表 5.22 自存状态下舱壁板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	146.2	0.7319
58 度	148.3	0.7424
90 度	149.3	0.7474
180 度	150.1	0.7514

表 5.23 自存状态 180 度浪向舱壁板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
18389	1.5007E+08	1.9975E+08	0.7513	1.3311
42573	1.4952E+08	1.9975E+08	0.7485	1.3360
22248	1.4358E+08	1.9975E+08	0.7188	1.3913
46432	1.4286E+08	1.9975E+08	0.7152	1.3982
61361	1.3826E+08	1.9975E+08	0.6921	1.4448
61366	1.3706E+08	1.9975E+08	0.6861	1.4574
18390	1.3525E+08	1.9975E+08	0.6771	1.4769
42574	1.3423E+08	1.9975E+08	0.6720	1.4881
19861	1.2721E+08	1.9975E+08	0.6368	1.5702
44045	1.2677E+08	1.9975E+08	0.6347	1.5757
44044	1.2585E+08	1.9975E+08	0.6301	1.5872
19860	1.2580E+08	1.9975E+08	0.6298	1.5878
61367	1.2313E+08	1.9975E+08	0.6164	1.6222
61362	1.2309E+08	1.9975E+08	0.6162	1.6228
19911	1.2221E+08	1.9975E+08	0.6118	1.6345
22247	1.2186E+08	1.9975E+08	0.6101	1.6392

表 5.24 自存状态下舱壁梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	175	0.5719
58 度	174.7	0.5709
90 度	174.1	0.5690
180 度	172	0.5621

表 5.25 自存状态 0 度浪向舱壁梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
25089	1.7502E+08	3.06E+08	0.5720	1.7484
49273	1.7422E+08	3.06E+08	0.5693	1.7564
25088	1.3715E+08	3.06E+08	0.4482	2.2312
49272	1.3657E+08	3.06E+08	0.4463	2.2406
18259	1.0955E+08	3.06E+08	0.3580	2.7932

42443	1.0930E+08	3.06E+08	0.3572	2.7996
25087	1.0572E+08	3.06E+08	0.3455	2.8944
49271	1.0528E+08	3.06E+08	0.3440	2.9067
42442	9.4338E+07	3.06E+08	0.3083	3.2437
18258	9.4298E+07	3.06E+08	0.3082	3.2450
25077	9.3439E+07	3.06E+08	0.3054	3.2749
17744	9.2353E+07	3.06E+08	0.3018	3.3134
42000	9.2160E+07	3.06E+08	0.3012	3.3203
49261	9.1784E+07	3.06E+08	0.2999	3.3339
25091	8.6645E+07	3.06E+08	0.2832	3.5316
49275	8.5979E+07	3.06E+08	0.2810	3.5590

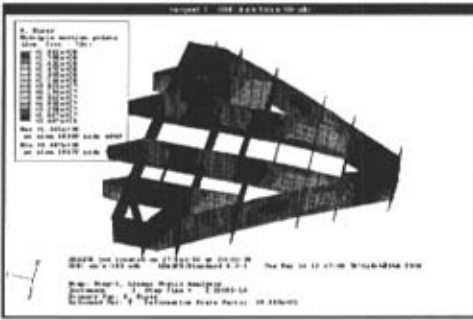


图 5.10 自存状态下舱壁板单元应力分布

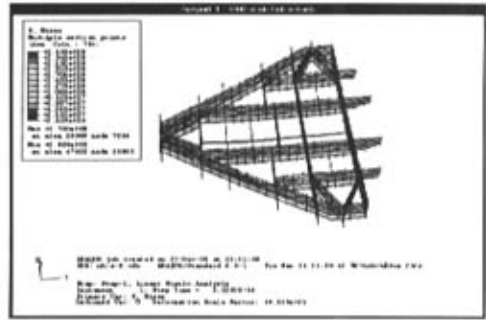


图 5.11 自存状态下舱壁梁单元应力分布

5.3.6 自存状态舷侧应力分析

自存状态下舷侧板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 5.26, 5.27, 5.28 和 5.29 所示, 自存状态下舷侧板单元应力分布和梁单元应力分布如图 5.12 和 5.13 所示。从中可以看出自存状态下舷侧板单元最大等效应力在浪向为 90 度时达到最大值为 75.3Mpa, 梁单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 83.74Mpa。

表 5.26 自存状态下舷侧板单元的最大等效应力表
(材料许用应力 = $235 \times 0.85 = 199.75\text{MPa}$)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	74.78	0.3744
58 度	75.13	0.3761
90 度	75.3	0.3770
180 度	75.27	0.3768

表 5.27 自存状态 90 度浪向舷侧板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
58501	7.5304E+07	1.9975E+08	0.3770	2.6526
9405	7.3770E+07	1.9975E+08	0.3693	2.7077
58502	6.8242E+07	1.9975E+08	0.3416	2.9271
9406	6.6731E+07	1.9975E+08	0.3341	2.9934
58511	6.1646E+07	1.9975E+08	0.3086	3.2403
9418	6.0353E+07	1.9975E+08	0.3021	3.3097
58510	5.4237E+07	1.9975E+08	0.2715	3.6829
9417	5.3124E+07	1.9975E+08	0.2660	3.7601
58520	5.2660E+07	1.9975E+08	0.2636	3.7932
9430	5.1467E+07	1.9975E+08	0.2577	3.8811
58529	4.7711E+07	1.9975E+08	0.2389	4.1867
60972	4.6793E+07	1.9975E+08	0.2343	4.2688
9442	4.6628E+07	1.9975E+08	0.2334	4.2839

表 5.28 自存状态下舷侧梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	83.74	0.2737
58 度	82.8	0.2706
90 度	81.98	0.2679
180 度	81.01	0.2647

表 5.29 自存状态 315 度浪向舷侧梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
30095	8.37E+07	3.06E+08	0.2737	3.6540
61177	8.35E+07	3.06E+08	0.2729	3.6642
14871	7.19E+07	3.06E+08	0.2350	4.2551
59255	7.16E+07	3.06E+08	0.2341	4.2718
15271	6.63E+07	3.06E+08	0.2168	4.6136
59626	6.50E+07	3.06E+08	0.2124	4.7089
30094	6.47E+07	3.06E+08	0.2114	4.7306
61176	6.45E+07	3.06E+08	0.2107	4.7454
14861	4.73E+07	3.06E+08	0.1547	6.4648
59252	4.71E+07	3.06E+08	0.1538	6.5001
14870	3.88E+07	3.06E+08	0.1268	7.8862
59254	3.87E+07	3.06E+08	0.1266	7.9000
30093	3.74E+07	3.06E+08	0.1222	8.1816
61175	3.73E+07	3.06E+08	0.1221	8.1928
59627	3.58E+07	3.06E+08	0.1170	8.5497
59620	3.54E+07	3.06E+08	0.1156	8.6480

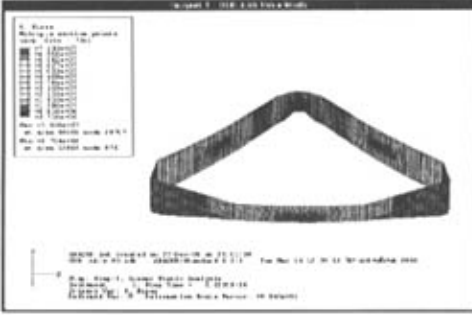


图 5.12 自存状态下舷侧板单元应力分布

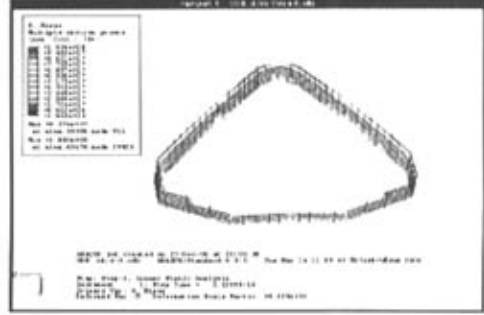


图 5.13 自存状态下舷侧梁单元应力分布

自存状态下的舷侧单元，跟其他位置的单元相比，属于低应力区域，也处于合理的许用应力范围之内，满足安全系数的要求。

5.4 本章小结

本章采用 ABAQUS 软件进行了计算，按等效应力分别对自存状态下平台的整体以及各部分主要结构进行强度分析，主要分析结果如下：

- (1) 对平台整体结构进行强度分析，得出自存状态下平台最大应力为 332.9 MPa（存在于桩腿梁单元），按许用应力准则满足安全系数要求；
- (2) 自存状态下平台结构最大弯曲应力及剪应力按许用应力准则满足安全系数要求；
- (3) 对平台各主要部分进行强度分析，得出自存状态平台高应力区域为桩腿及船体结构的骨材。

第六章 平台作业状态分析

6.1 概述

平台作业条件下的强度分析属于静力分析的一种，1年重现期的环境事件被选为分析条件。

6.1.1 作业状态平台负荷

作业状态下平台的各种负荷明细见表 6.1 所示。

表 6.1 作业状态平台负荷明细

名称	重量 (吨)
平台结构及设备	5836.83
液体可变载荷	746.44
固体可变载荷	664.12
压载载荷	662.75
大钩平均载荷	453.6
桩腿及桩靴	1820.21
总计	10183.24

6.1.2 环境条件

a. 水深 27m

b. 浪：计算了 4 个浪向：0 度，58 度，90 度，180 度，波高和周期见表 6.2。

表 6.2 波高 (m) 和周期 (s)

Hmax	12
Tm	10.4

其中：Hmax --- 最大波高；

Tm ----- 最大波高对应的周期。

c. 流：表层流速和表层以下 15.24m 的流速见表 6.3。

表 6.3 流速 (m/s)

表层	1.27
表层以下 15.24 米	0.54

d. 风：在海面上 10 米高程处风速是 35.97m/s。

6.1.4 海生物

作业状态下水下和飞溅区的海生物厚度见表 6.4 所示，密度：1.372t/m³；

表 6.4 作业状态下海生物厚度

	海生物厚度
水下构件	5cm
飞溅区构件	10cm

6.2 计算工况

作业状态下各种计算工况详见第四章。

6.3 计算结果

根据 ABS 规范^[42]及中国船级社规范^[43]，在静载荷和环境载荷共同作用下，平台强度按等单向应力及等效应力分别校核：许用应力=屈服强度×许用应力系数。见表 6.5。

表 6.5 作业状态下许用应力系数

采用规范	应力种类	许用应力系数值
ABS	压应力	0.8
	剪切应力	0.532
CCS	等效应力	0.85

通过计算分析，得出了作业状态下平台的整体应力分布，如图 6.1 所示，从图中可以看出自存状态下高应力区域为桩腿及船体结构的骨材。

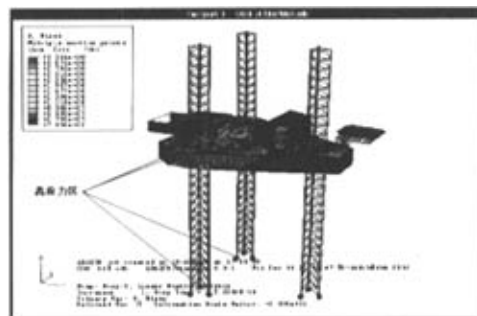


图 6.1 作业状态下平台整体应力分布

6.3.1 作业状态桩腿位移和应力分析

通过计算分析，得出了作业状态下桩腿的最大位移，最大等效应力和桩腿高应力单元，如表 6.6, 6.7 和 6.8 所示，可以看出作业状态下，当浪向为 90 度时，桩腿应力达到最大值为 372.5MPa，当浪向为 0 度时，桩腿位移达到最大值为 12.14cm，作业状态下平台桩腿位移图和应力图如图 6.2，

6.3 所示。

表 6.6 作业状态下桩腿的最大位移表

浪向	位移(cm)
0 度	12.14
58 度	11.77
90 度	11.41
180 度	10.86

表 6.7 作业状态下桩腿的最大等效应力表
(材料许用应力=689×0.85=585.7MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	371.6	0.63
58 度	372.1	0.64
90 度	372.5	0.64
180 度	372.3	0.64

表 6.8 作业状态 90 度浪向桩腿高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
5270	3.7253E+08	5.8570E+08	0.5683	1.7596
5273	3.3048E+08	5.8570E+08	0.5642	1.7723
5276	3.2576E+08	5.8570E+08	0.5562	1.7980
1143	2.6021E+08	5.8570E+08	0.4443	2.2509
1142	2.6021E+08	5.8570E+08	0.4443	2.2509
1144	2.6020E+08	5.8570E+08	0.4442	2.2510
1145	2.6017E+08	5.8570E+08	0.4442	2.2512
1146	2.6012E+08	5.8570E+08	0.4441	2.2517
1147	2.6006E+08	5.8570E+08	0.4440	2.2522
5019	2.5701E+08	5.8570E+08	0.4388	2.2789
5018	2.5621E+08	5.8570E+08	0.4374	2.2861
5017	2.5541E+08	5.8570E+08	0.4361	2.2932
5016	2.5463E+08	5.8570E+08	0.4347	2.3002
4377	2.5401E+08	5.8570E+08	0.4337	2.3058
5015	2.5386E+08	5.8570E+08	0.4334	2.3072
4366	2.5362E+08	5.8570E+08	0.4330	2.3094
5014	2.5311E+08	5.8570E+08	0.4321	2.3140
4376	2.5302E+08	5.8570E+08	0.4320	2.3149
4367	2.5290E+08	5.8570E+08	0.4318	2.3159

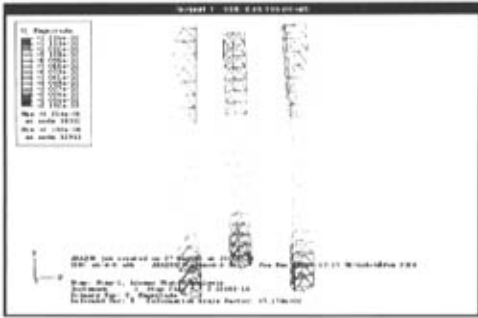


图 6.2 作业状态下平台桩腿位移

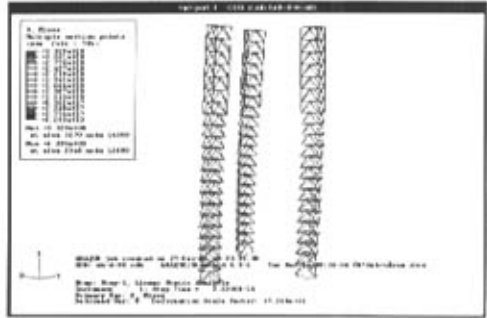


图 6.3 作业状态下平台桩腿应力

根据 ABS 规范^[42]以及中国船级社规范^[43], 在静载荷和环境载荷共同作用下, 平台作业状态最大应力校核如表 6.9:

表 6.9 作业状态平台桩腿梁单元最大应力校核

浪向 (度)	应力类别					
	压应力 ($0.8\sigma_s$)		剪切应力 ($0.532\sigma_s$)		等效应力 ($0.85\sigma_s$)	
	应力值 (MPa)	应力比	应力值 (MPa)	应力比	应力值 (MPa)	应力比
0	364.4	0.6611	5.57	0.0152	371.6	0.63
58	364.7	0.6616	5.58	0.0152	372.1	0.64
90	364.8	0.6618	5.58	0.0152	372.5	0.64
180	363.8	0.6600	5.57	0.0152	372.3	0.64

经过以上计算分析, 可知钻井作业状态下桩腿在四个浪向的应力相差不大, 满足应力的许用范围, 是安全的。平台托航后, 平台气隙升高, 主要对桩腿产生较大的影响, 从上面的分析也可以看出, 高应力区域也主要集中在平台的桩腿部分, 经过计算分析, 从上面的图形数据可以看出, 桩腿的单向应力和等效应力均在合理的许用应力范围之内, 满足平台的载荷要求, 可以继续钻井作业。

6.3.2 作业状态主甲板应力分析

作业状态下主甲板板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 6.10, 6.11, 6.12 和 6.13 所示, 作业状态下主甲板板单元应力分布和梁单元应力分布如图 6.4 和 6.5 所示。从中可以看出作业状态下主甲板板单元最大等效应力在浪向为 90 度时达到最大值为 83.86Mpa, 梁单元最大等效应力在各个浪向均为 241.7Mpa。

表 6.10 作业状态下主甲板板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	83.83	0.4197
58 度	83.86	0.4198
90 度	83.86	0.4198
180 度	83.82	0.4196

表 6.11 作业状态 90 度浪向主甲板板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
55509	8.3864E+07	1.9975E+08	0.4198	2.3818
25914	8.2844E+07	1.9975E+08	0.4147	2.4112
55658	7.6344E+07	1.9975E+08	0.3822	2.6165
26758	7.5770E+07	1.9975E+08	0.3793	2.6363
55527	7.5649E+07	1.9975E+08	0.3787	2.6405
25932	7.5559E+07	1.9975E+08	0.3783	2.6436
28203	7.5109E+07	1.9975E+08	0.3760	2.6595
55914	7.4870E+07	1.9975E+08	0.3748	2.6680
55653	6.3522E+07	1.9975E+08	0.3180	3.1446
26753	6.3003E+07	1.9975E+08	0.3154	3.1705
29384	6.2502E+07	1.9975E+08	0.3129	3.1959
26757	6.2079E+07	1.9975E+08	0.3108	3.2177
55657	6.2009E+07	1.9975E+08	0.3104	3.2213
55938	6.1702E+07	1.9975E+08	0.3089	3.2373
79	5.9393E+07	1.9975E+08	0.2973	3.3632
52826	5.8748E+07	1.9975E+08	0.2941	3.4001

表 6.12 作业状态下主甲板梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	241.7	0.7899
58 度	241.7	0.7899
90 度	241.7	0.7899
180 度	241.7	0.7899

表 6.13 作业状态 0 度浪向主甲板梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
52997	2.4172E+08	3.06E+08	0.7899	1.2659
244	2.4121E+08	3.06E+08	0.7883	1.2686
27959	2.3749E+08	3.06E+08	0.7761	1.2885
55866	2.3480E+08	3.06E+08	0.7673	1.3033
306	2.1877E+08	3.06E+08	0.7149	1.3987

53059	2.1872E+08	3.06E+08	0.7148	1.3991
26987	2.1763E+08	3.06E+08	0.7112	1.4060
55747	2.1437E+08	3.06E+08	0.7005	1.4275
27135	2.1427E+08	3.06E+08	0.7002	1.4281
55797	2.1427E+08	3.06E+08	0.7002	1.4281
6590	2.1202E+08	3.06E+08	0.6929	1.4433
53908	2.1158E+08	3.06E+08	0.6914	1.4462
55242	2.0690E+08	3.06E+08	0.6761	1.4790
8148	2.0688E+08	3.06E+08	0.6761	1.4791
55629	2.0652E+08	3.06E+08	0.6749	1.4817

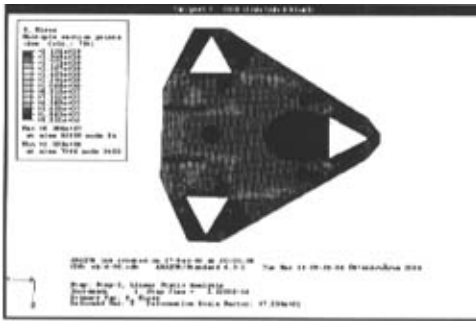


图 6.4 作业状态下主甲板板单元应力分布

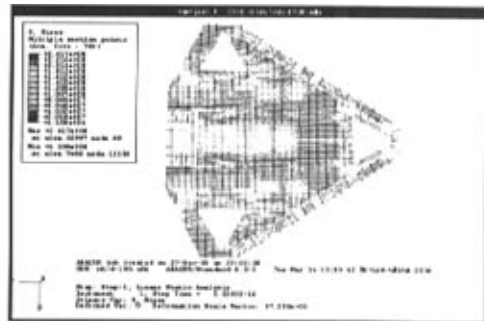


图 6.5 作业状态下主甲板梁单元应力分布

作业状态下的平台主甲板在各个浪向的单元应力均在合理的许用应力范围之内，满足安全系数要求。

6.3.3 作业状态机械甲板应力分析

作业状态下机械甲板板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 6.14, 6.15, 6.16 和 6.17 所示，作业状态下机械甲板板单元应力分布和梁单元应力分布如图 6.6 和 6.7 所示。从中可以看出作业状态下机械甲板板单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 47.89Mpa，梁单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 185Mpa。

表 6.14 作业状态下机械甲板板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	47.89	0.2397
58 度	47.88	0.2397
90 度	47.88	0.2397
180 度	47.84	0.2395

表 6.15 作业状态 0 度浪向机械甲板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
57401	4.79E+07	1.9975E+08	0.2398	4.1708
8838	4.76E+07	1.9975E+08	0.2384	4.1953
57110	4.5758E+07	1.9975E+08	0.2291	4.3654
57092	4.5227E+07	1.9975E+08	0.2264	4.4166
57091	4.3586E+07	1.9975E+08	0.2182	4.5829
57109	4.3388E+07	1.9975E+08	0.2172	4.6038
57968	4.14E+07	1.9975E+08	0.2074	4.8206
57108	4.1371E+07	1.9975E+08	0.2071	4.8283
8739	4.1354E+07	1.9975E+08	0.2070	4.8302
57302	4.1230E+07	1.9975E+08	0.2064	4.8448
30910	4.11E+07	1.9975E+08	0.2059	4.8572
57970	4.01E+07	1.9975E+08	0.2008	4.9790
30912	3.96E+07	1.9975E+08	0.1983	5.0439
57090	3.8833E+07	1.9975E+08	0.1944	5.1438

表 6.16 作业状态下机械甲板梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	185	0.6046
58 度	184.9	0.6042
90 度	184.9	0.6042
180 度	184.9	0.6042

表 6.17 作业状态 0 度浪向机械甲板梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
9317	1.85E+08	3.06E+08	0.6047	1.6537
57880	1.84E+08	3.06E+08	0.6011	1.6636
9319	1.59E+08	3.06E+08	0.5209	1.9199
9296	1.59E+08	3.06E+08	0.5205	1.9213
57882	1.59E+08	3.06E+08	0.5199	1.9236
57574	1.56E+08	3.06E+08	0.5093	1.9636
57859	1.55E+08	3.06E+08	0.5060	1.9762
8993	1.50E+08	3.06E+08	0.4903	2.0397
9297	1.50E+08	3.06E+08	0.4902	2.0400
57860	1.50E+08	3.06E+08	0.4901	2.0404
57626	1.50E+08	3.06E+08	0.4891	2.0446
9318	1.49E+08	3.06E+08	0.4859	2.0580
57881	1.49E+08	3.06E+08	0.4859	2.0581
57556	1.49E+08	3.06E+08	0.4858	2.0585
9327	1.48E+08	3.06E+08	0.4831	2.0701

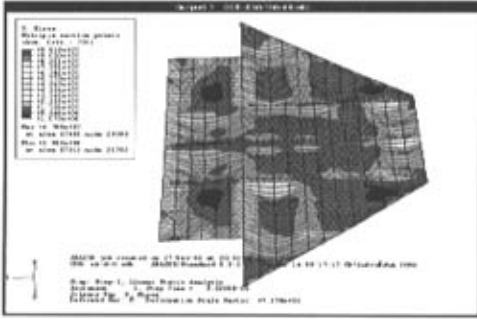


图 6.6 作业状态下机械甲板板单元应力分布



图 6.7 作业状态下机械甲板梁单元应力分布

通过上面的图形数据分析，作业状态下的机械甲板的板梁单元均在合理的许用应力范围之内，满足合理的安全系数的要求。

6.3.4 作业状态底甲板应力分析

作业状态下底甲板板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 6.18, 6.19, 6.20 和 6.21 所示，作业状态下底甲板板单元应力分布和梁单元应力分布如图 6.8 和 6.9 所示。从中可以看出作业状态下底甲板板单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 97.23Mpa，梁单元最大等效应力在各个浪向均为 191.7Mpa。

表 6.18 作业状态下底甲板板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	97.2	0.4866
58 度	97.02	0.4857
90 度	97.01	0.4857
180 度	97.23	0.4868

表 6.19 作业状态 180 度浪向底甲板板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
39412	9.7227E+07	1.9975E+08	0.4867	2.0545
13179	9.6827E+07	1.9975E+08	0.4847	2.0630
39400	9.3614E+07	1.9975E+08	0.4687	2.1338
13167	9.3350E+07	1.9975E+08	0.4673	2.1398
39401	8.8308E+07	1.9975E+08	0.4421	2.2620
13168	8.8057E+07	1.9975E+08	0.4408	2.2684
39399	8.3879E+07	1.9975E+08	0.4199	2.3814
39411	8.3848E+07	1.9975E+08	0.4198	2.3823
13166	8.3625E+07	1.9975E+08	0.4186	2.3887
39413	8.3421E+07	1.9975E+08	0.4176	2.3945
13178	8.3366E+07	1.9975E+08	0.4174	2.3961

13180	8.3087E+07	1.9975E+08	0.4160	2.4041
39375	8.2590E+07	1.9975E+08	0.4135	2.4186
13142	8.2479E+07	1.9975E+08	0.4129	2.4218

表 6.20 作业状态下底甲板梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	191.7	0.6265
58 度	191.7	0.6265
90 度	191.7	0.6265
180 度	191.7	0.6265

表 6.21 作业状态 90 度浪向底甲板梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
37984	1.92E+08	3.06E+08	0.6264	1.5964
11048	1.88E+08	3.06E+08	0.6129	1.6316
38002	1.84E+08	3.06E+08	0.6001	1.6665
38092	1.81E+08	3.06E+08	0.5924	1.6880
11066	1.79E+08	3.06E+08	0.5863	1.7055
11156	1.79E+08	3.06E+08	0.5835	1.7138
38074	1.74E+08	3.06E+08	0.5673	1.7628
11138	1.72E+08	3.06E+08	0.5607	1.7834
38366	1.69E+08	3.06E+08	0.5528	1.8090
11430	1.68E+08	3.06E+08	0.5503	1.8171
38110	1.68E+08	3.06E+08	0.5484	1.8235
11174	1.67E+08	3.06E+08	0.5472	1.8275
38270	1.62E+08	3.06E+08	0.5294	1.8889
11334	1.61E+08	3.06E+08	0.5262	1.9002
38038	1.60E+08	3.06E+08	0.5244	1.9069

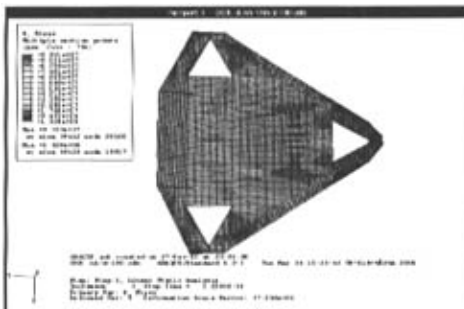


图 6.8 作业状态下底甲板板单元应力分布



图 6.9 作业状态下底甲板梁单元应力分布

通过上面的图形数据分析，作业状态下的底甲板的板梁单元在许用应力范围之内，满足合理

的安全系数要求。

6.3.5 作业状态舱壁应力分析

作业状态下舱壁板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 6.22, 6.23, 6.24 和 6.25 所示, 作业状态下舱壁板单元应力分布和梁单元应力分布如图 6.10 和 6.11 所示。从中可以看出作业状态下舱壁板单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 198MPa, 梁单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 176.1MPa。

表 6.22 作业状态下舱壁板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	196.8	0.9852
58 度	197.5	0.9887
90 度	197.9	0.9907
180 度	198	0.9912

表 6.23 作业状态 180 度浪向舱壁板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
46432	1.9803E+08	1.9975E+08	0.9914	1.0087
22248	1.9798E+08	1.9975E+08	0.9911	1.0089
25944	1.9365E+08	1.9975E+08	0.9694	1.0315
49742	1.9353E+08	1.9975E+08	0.9689	1.0321
22247	1.6810E+08	1.9975E+08	0.8415	1.1883
46431	1.6791E+08	1.9975E+08	0.8406	1.1896
46433	1.6598E+08	1.9975E+08	0.8309	1.2035
22249	1.6535E+08	1.9975E+08	0.8278	1.2081
18389	1.5069E+08	1.9975E+08	0.7544	1.3256
42573	1.5028E+08	1.9975E+08	0.7523	1.3292
46434	1.4922E+08	1.9975E+08	0.7470	1.3386
22250	1.4856E+08	1.9975E+08	0.7437	1.3445
46484	1.3935E+08	1.9975E+08	0.6976	1.4335
22300	1.3880E+08	1.9975E+08	0.6948	1.4392

表 6.24 作业状态下舱壁梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	176.1	0.5755
58 度	174.9	0.5716
90 度	174.3	0.5696
180 度	173	0.5654

表 6.25 作业状态 0 度浪向舱壁梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
49273	1.76E+08	3.06E+08	0.5755	1.7376
25089	1.75E+08	3.06E+08	0.5724	1.7470
49272	1.38E+08	3.06E+08	0.4517	2.2139
25088	1.37E+08	3.06E+08	0.4493	2.2258
18259	1.27E+08	3.06E+08	0.4143	2.4138
42443	1.27E+08	3.06E+08	0.4134	2.4187
24922	1.11E+08	3.06E+08	0.3629	2.7554
49106	1.10E+08	3.06E+08	0.3592	2.7838
49271	1.07E+08	3.06E+08	0.3487	2.8674
25087	1.06E+08	3.06E+08	0.3471	2.8808
42442	1.05E+08	3.06E+08	0.3438	2.9090
18258	1.05E+08	3.06E+08	0.3436	2.9105
49534	1.05E+08	3.06E+08	0.3417	2.9267
25350	1.03E+08	3.06E+08	0.3369	2.9686
49859	1.00E+08	3.06E+08	0.3269	3.0594
26061	9.99E+07	3.06E+08	0.3264	3.0639

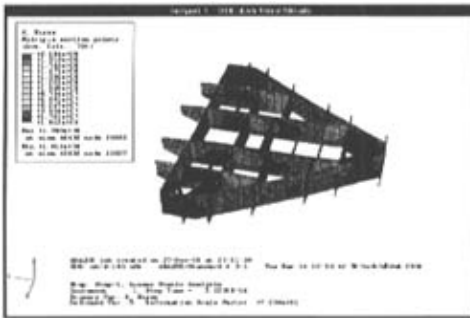


图 6.10 作业状态下舱壁板单元应力分布

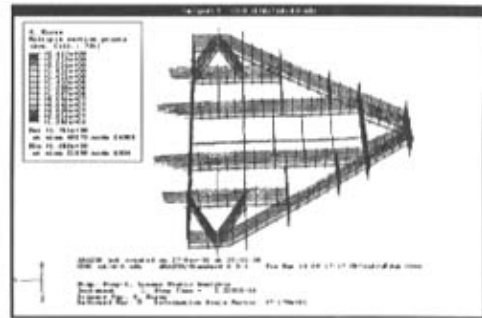


图 6.11 作业状态下舱壁梁单元应力分布

作业状态下的舱壁内部结构单元的应力值在许用应力的范围之内，满足合理的安全系数的要求。

6.3.6 作业状态舷侧应力分析

作业状态下舷侧板单元和梁单元的最大等效应力和高应力单元分别如图 6.26, 6.27, 6.28 和 6.29 所示，作业状态下舷侧板单元应力分布和梁单元应力分布如图 6.12 和 6.13 所示。从中可以看出作业状态下舷侧板单元最大等效应力在浪向为 180 度时达到最大值为 151.9Mpa,梁单元最大等效应力在浪向为 0 度时达到最大值为 95Mpa。

表 6.26 作业状态下舷侧板单元的最大等效应力表
(材料许用应力=235×0.85=199.75MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	151.8	0.7599
58 度	151.9	0.7605
90 度	151.9	0.7605
180 度	151.9	0.7605

表 6.27 作业状态 180 度浪向舷侧板单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
12945	1.5187E+08	1.9975E+08	0.7603	1.3153
58925	1.5150E+08	1.9975E+08	0.7584	1.3185
58901	1.3437E+08	1.9975E+08	0.6727	1.4866
12921	1.3319E+08	1.9975E+08	0.6668	1.4997
12946	1.1294E+08	1.9975E+08	0.5654	1.7686
58926	1.1282E+08	1.9975E+08	0.5648	1.7706
58902	1.0249E+08	1.9975E+08	0.5131	1.9490
12922	1.0115E+08	1.9975E+08	0.5064	1.9748
58922	9.7867E+07	1.9975E+08	0.4899	2.0410
58903	9.5174E+07	1.9975E+08	0.4765	2.0988
12942	9.5119E+07	1.9975E+08	0.4762	2.1000
12923	9.4681E+07	1.9975E+08	0.4740	2.1097
58848	9.0548E+07	1.9975E+08	0.4533	2.2060
12868	9.0346E+07	1.9975E+08	0.4523	2.2110
58900	9.0258E+07	1.9975E+08	0.4519	2.2131
12897	8.9501E+07	1.9975E+08	0.4481	2.2318

表 6.28 作业状态下舷侧梁单元的最大等效应力表
(材料许用应力=360×0.85=306MPa)

浪向	等效应力(MPa)	应力比
0 度	95	0.3105
58 度	94.05	0.3074
90 度	93.24	0.3047
180 度	92.26	0.3015

表 6.29 作业状态 0 度浪向舷侧梁单元高应力单元列表

单元号	应力	许用应力/MPa	应力比	安全系数
30095	9.5002E+07	3.06E+08	0.3105	3.2210
61177	9.4758E+07	3.06E+08	0.3097	3.2293
15130	8.2026E+07	3.06E+08	0.2681	3.7305
59507	8.1949E+07	3.06E+08	0.2678	3.7340
14871	8.0340E+07	3.06E+08	0.2625	3.8088

59255	8.0031E+07	3.06E+08	0.2615	3.8235
15271	7.6078E+07	3.06E+08	0.2486	4.0222
59626	7.3915E+07	3.06E+08	0.2416	4.1399
30094	7.2758E+07	3.06E+08	0.2378	4.2057
61176	7.2551E+07	3.06E+08	0.2371	4.2178
15135	6.4398E+07	3.06E+08	0.2105	4.7517
59512	6.4131E+07	3.06E+08	0.2096	4.7715
15128	5.6502E+07	3.06E+08	0.1846	5.4157
15123	5.5985E+07	3.06E+08	0.1830	5.4657
59500	5.5090E+07	3.06E+08	0.1800	5.5545

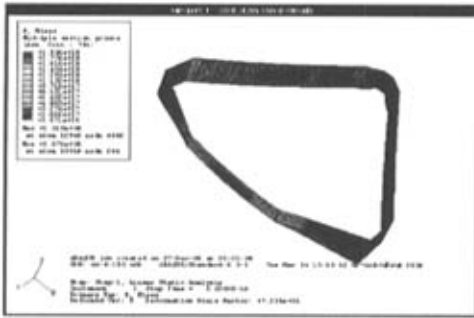


图 6.12 作业状态下舷侧板单元应力分布

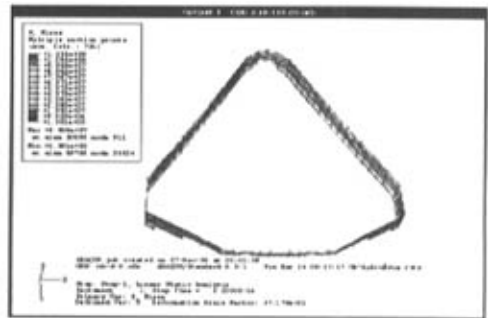


图 6.13 作业状态下舷侧梁单元应力分布

通过上面图形数据分析，舷侧属于平台的低应力区域，其各个单元的应力值均在许用应力范围之内，满足合理的安全系数的要求。

6.4 本章小结

本章采用 ABAQUS 软件进行了计算，按等效应力分别对自存状态下平台的整体以及各部分主要结构进行强度分析，主要分析结果如下：

- (1)对平台整体结构进行强度分析，作业状态下平台最大应力为 372.5 MPa，按许用应力准则，满足规范要求，可以继续作业，危险区域位于桩腿啮合齿条部位；
- (2)作业状态下平台结构最大压应力及剪应力按许用应力准则，满足规范要求；
- (3)对平台各主要部分进行强度分析，得出作业状态下平台高应力区域为桩腿、主甲板、底甲板以及舱壁。

第七章 平台抗倾覆分析

7.1 抗倾覆力矩和倾覆力矩

平台倾覆力矩, M_{Zq} 按下式计算:

$$M_{Zq} = M_F + M_L \quad kN \cdot m \quad (7-1)$$

式中: M_F : 风压倾覆力矩; M_L : 波浪倾覆力矩;

M_F 风压倾覆力矩按下式计算:

$$M_F = FZ_a \quad kNm \quad (7-2)$$

式中: F : 风力; Z_a : 风压中心到铰接点垂直距离;

波浪倾覆力矩 M_L , 按下式计算:

$$M_L = \sum (F_{Li} \times Z_{Li}) \quad kN \cdot m \quad (7-3)$$

式中: F_{Li} : 平台第 i 项构件所受到的波浪力在可形成倾覆力矩方向上的分力; Z_{Li} : F_{Li} 对铰接点垂直距离;

平台抗倾覆力矩, M_{Zk} 按下式计算:

$$M_{Zk} = W_z \times Y_0 \quad (7-4)$$

式中: W_z : 减去浮力后的平台重量; Y_0 : W_z 对倾覆轴的水平距离;

平台的抗倾稳性以抗倾安全系数 K_{Zq} 来衡量:

$$K_{Zq} = \frac{M_{Zk}}{M_{Zq}} \quad (7-5)$$

K_{Zq} 的最小值见表 7.1:

表 7.1 K_{Z_0} 最小值

工况	自升式平台
正常作业	1.5
自存	1.3

7.2 平台抗倾覆分析

自存和作业两种状态下的抗倾覆分析如下表 7.2 所示。

表 7.2 平台抗倾覆分析

条件	浪向	计算参数					抗倾安全系数	结果
		风力 (吨)	波浪力 (吨)	平台重量 (吨)	力臂 (米)	力矩 (吨米)		
作业条件	0 度浪向	风力 (吨)	122.4	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	7466	26.3
		波浪力 (吨)	210	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8190	
		平台重量 (吨)	10858	力臂 (米)	37.9	力矩 (吨米)	411518	
	58 度浪向	风力 (吨)	115.0	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	7015	26.3
		波浪力 (吨)	210	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8190	
		平台重量 (吨)	10858	力臂 (米)	36.5	力矩 (吨米)	396317	
	90 度浪向	风力 (吨)	139.1	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	8485	21.1
		波浪力 (吨)	210	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8190	
		平台重量 (吨)	10858	力臂 (米)	32.3	力矩 (吨米)	350713	
	180 度浪向	风力 (吨)	104.7	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	6387	20
		波浪力 (吨)	210	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8190	
		平台重量 (吨)	10858	力臂 (米)	26.9	力矩 (吨米)	292080	
自存条件	0 度浪向	风力 (吨)	249	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	15189	15.5
		波浪力 (吨)	212	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8268	
		平台重量 (吨)	9696	力臂 (米)	37.9	力矩 (吨米)	367478	
	58 度浪向	风力 (吨)	234	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	14274	15.7
		波浪力 (吨)	212	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8268	
		平台重量 (吨)	9696	力臂 (米)	36.5	力矩 (吨米)	353904	
	90 度浪向	风力 (吨)	283	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	17263	12.2
		波浪力 (吨)	212	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8268	
		平台重量 (吨)	9696	力臂 (米)	32.3	力矩 (吨米)	313180	
	180 度浪向	风力 (吨)	213	力臂 (米)	61	力矩 (吨米)	12993	12.1
		波浪力 (吨)	212	力臂 (米)	39	力矩 (吨米)	8268	
		平台重量 (吨)	9696	力臂 (米)	26.9	力矩 (吨米)	260822	

7.3 本章小结

平台在作业条件下抗倾安全系数 K_{Z_0} 大于 1.5，满足抗倾安全系数的要求；
 平台在自存条件下抗倾安全系数 K_{Z_0} 大于 1.3，满足抗倾安全系数的要求。

第八章 总结与展望

8.1 总结

1. 本文在总结以往海洋平台安全评估经验的基础上,根据实际平台结构图纸等资料,利用高级有限元分析软件 Patran,建立了能真实反映该平台结构状况的有限元模型,该模型能准确地反映平台安全的桩靴及土壤的相互作用情况、动态特性,进而能更加精确地计算桩腿的强度极限。为进一步反映平台桩腿与海床的相互作用,利用 ABAQUS 独有的技术,发展了三维铰单元,解决了以前用经验的 3 倍桩径做法带来的可能偏差。

2. 计算平台重力载荷、波浪载荷、风载等,根据操船手册和平台工作海区环境资料,参照平台设计规范的有关章节,计算出各种载荷工况及其组合工况。

3. 使用有限元分析软件 ABAQUS 对平台在风暴自存和作业两种状态作分析计算,并得出平台应力分布,针对上面确定每一种计算工况,逐一进行求解,处理和分析计算数据结果,将计算结果以图形、曲线、表格的形式表达出来,并对其进行相应的分析。自存状态与作业状态相比,环境条件差别较小,只有风速和流速有所不同,而作业条件下,平台整体重量比自存条件下大 1000 吨左右,桩腿应力主要源于平台重量,因此作业时桩腿应力要大于自存时桩腿的应力。

4. 对平台还进行了抗倾覆分析,得出了平台在自存和作业两种状态下的抗倾安全系数,并作了相应的分析,均满足规范规定的要求。

8.2 展望

综上所述,尽管本文的研究取得了一些积极的成果,但是限于本文作者的水平、时间等原因,还有很多具体内容没有来得及完成,作者认为可以在以下几个方面进一步展开研究:

1. 由于时间紧张和问题的复杂性,对平台结构的腐蚀严重的部分构件未进行进一步的分析计算,得出腐蚀严重部分的应力分析情况。

2. 另外,由于时间紧张,本文未对平台结构中存在裂纹部分构件进行断裂分析和疲劳评估,此还有待进一步的分析计算和分析。

3. 本文并未考虑存在地震等载荷等作用时的情况。

参考文献

- [1] 俞学礼. 海洋石油开发百年回顾. 上海科学技术出版社, 科学杂志第4期
- [2] Timoshenko S, Goodier J N. Theory of Elasticity^[M]
- [3] Ueda Y, Rashed S M N. ISUM applied to marine structures [J]. Transactions of JWRI, 1991, 20(1): 123-136
- [4] Courant R. Variational method for solutions of problems of equilibrium and vibrations [J] Bull. Am. Math. Soc., 1943, 49: 1-23.
- [5] 华孝良, 徐光辉. 桥梁结构非线性分析. 北京: 人民交通出版社, 1994, 356~378
- [6] 杨国金. 海洋工程灾害与环境荷载. 中国海洋平台, 1995, 10 (1): 202~205
- [7] 孙丽萍, 聂武. 海洋工程概论. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000, 156~231
- [8] 李润培, 王志农. 海洋平台强度分析. 上海: 上海交大出版社, 1992, 128~135
- [9] 王晓燕. 海洋工程的安全风险评估研究. 山东科学, 2005, 18 (5): 41~47
- [10] C Guedes Soares. Risk and Reliability in Marine Technology [M]. Netherlands: A. A. Balkema, 1998.
- [11] 秦炳军, 张圣坤. 动态过程风险评估方法. 上海交通大学学报, 1998, 32 (11): 17~25
- [12] 俞庆, 肖熙. 海洋平台结构风险评估. 海洋工程, 1997, 15 (3): 1~7
- [13] 欧进萍, 肖仪清, 黄虎杰, 等. 海洋平台结构实时安全监测系统. 海洋工程, 2001, 19 (2): 1~6
- [14] 张大勇, 李刚, 岳前进. 海洋平台优化设计的研究进展. 海洋工程, 2005, 23 (1): 107~113
- [15] 罗桦斌, 张世英. 海洋平台定量评估. 管理工程学报, 1999, (1): 42~46
- [16] 赵峰. 海洋平台及设备可靠性的评价与检测. 石油机械, 2000, (11): 89~93
- [17] 李玉刚, 林焰, 纪卓尚. 海洋平台安全评估的发展历史和现状. 中国海洋平台, 18 (1): 4~8
- [18] 李玉刚. 综合安全评估方法(FSA) 在海洋平台上的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002
- [19] 李玉刚. 渤海8号自升式海洋钻井平台结构总强度计算书(Report 200110B8-1) [R]. 大连: 大连理工大学船舶 CAD 工程中心
- [20] 李茜, 杨树耕. 采用 ANSYS 程序的自升式平台结构有限元动力分析. 中国海洋平台, 2003, 18 (4): 41~46
- [21] 杨树耕, 孟昭璞, 任贵永. 采用 ANSYS 程序的导管架平台结构有限元分析. 中国海洋平台, 2000, (5): 59~63
- [22] 崔振南, 刘喜华, 吴育华. 基于 ANSYS 的海洋平台自振特性分析. 青岛大学学报, 2005, 18 (1): 38~47
- [23] 欧进萍, 刘学东, 陆钦年, 等. 现役导管架式海洋平台结构整体安全度评估. 海洋工程, 1996,

- 14 (3): 83~90
- [24] 余建星, 黄鑫. 新型海洋平台裙装套筒结构的强度分析. 海洋技术, 2005, 24 (1): 86~89
- [25] 孙玉武, 聂武. 自升式海洋平台后服役期的疲劳强度及寿命分析. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22 (2): 10~14
- [26] Li H J, Hu S J, Tomotsuka. The optimal design of TMD for offshore structures. China Ocean Engineering, 1999, 38 (2): 1332144
- [27] 陆建辉, 彭临慧. 固定式近海石油平台振动控制研究. 中国造船, 2000, 41 (3): 63268
- [28] 杨升田. 导管架海洋平台自振特性的简化计算方法. 应用力学学报, 1993, 10 (3): 1032108
- [29] 孙树民. 独桩平台振动控制. 中国海上油气(工程), 2000, 12 (6): 12216
- [30] 张兆德, 王德禹. 一座海洋平台改造的强度分析. 中国海洋平台, 2003, 28 (5): 26~29
- [31] 吴晓源, 夏利娟, 何炎平. “航工平 1” 自升式抛石整平平台强度分析. 中国海洋平台, 2004, 19 (2): 24~26
- [32] 李林普, 金伟良. 自升式钻井平台结构疲劳寿命分析. 大连理工大学学报, 1989, 29 (3): 56~59
- [33] 申仲翰, 许滨, 赵强, 等. 钢结构海洋平台整体安全性评估方法研究. 力学所研究报告, 1994, 5: 129~136
- [34] 秦太验, 柳春图, 阚常珍. 具有失真性变形与凹坑耦合损伤的海洋平台桩腿有限元分析. 计算力学学报, 2000, 17 (4), 461~467
- [35] 王立忠, 张韶光. 冰区自升式平台桩腿的强度的安全评估研究. 中国海洋平台, 2005, 20(5), 12~16
- [36] 邢金有, 隋智亨. 老龄平台极限强度评估. 中国海洋平台, 2004, 19 (2), 35~37
- [37] 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法(第二版).北京: 清华大学出版社, 2004, 1~30
- [38] 段梦兰, 陈永福, 李林斌, 等. 海洋平台结构的最新研究进展第 9 届 ISOPE 大会报告综述. 海洋工程, 2000, 8(1): 2
- [39] 刘兵山, 黄聪. Patran 从入门到精通. 北京: 中国水利水电出版社出版, 2003, 1~27
- [40] Sarpkaya T. Mechanics of wave forces on offshore structure VNR Company. New York: 1981
- [41] 李远林. 近海结构水动力学. 广州: 华南理工大学出版社, 1999, 86~97
- [42] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范. 1992, 2-19
- [43] Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units. 2001, 88
- [44] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范 2005, 2~19

致谢

本论文是在导师秦太验教授的悉心指导下完成的，在我的硕士阶段，导师以他的智慧和远见对我开导、启迪，大大拓宽了我的知识面，对我的研究素养的形成、研究能力的提高起到重要作用。两年来，我从导师那里学到了更多的知识，更学会了生活、学会了做人，导师渊博的知识、敏锐的洞察力和勤奋严谨的治学态度都在潜移默化中影响着我；导师高尚的人品、开朗乐观的人生态度以及对人的宽容无时无刻不在感染着我。

其次，感谢中国船级社实业公司的段梦兰总工程师在做课题完成项目的过程中提供的帮助，段总渊博的知识和精深的专业知识让我感觉在实业公司的这段时间里受益匪浅，感谢段总让我在船级社实业公司的这段时间里有机会通过这个实际工程项目来锻炼自己和提高自己；另外感谢项目组成员李杰博士和王懿博士在项目进行中给予的提点以及对论文中模型的修正；感谢师兄朱伯靖博士对论文提出的宝贵意见和建议。

最后，感谢系里的其他老师和实验室里的兄弟姐妹们，正是因为有了大家的关心照顾，我才能得以顺利完成论文。

作者：栗文彬

2006年6月

个人简介

栗文彬，男，1982年11月出生，山东泰安人，中共预备党员。

2000年9月-2004年7月 山东科技大学 过程装备与控制工程专业 工学学士学位

2004年9月至今 中国农业大学 理学院 固体力学专业 工学硕士学位