



杨 进 刘书杰 姜 伟 谢仁军 著

ANSYS

在海洋石油工程中的应用

ANSYS ZAI HAIYANG SHIYOU GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG



石油工业出版社

ANSYS

在海洋石油工程中的应用

■ 杨 进 刘书杰 姜 伟 谢仁军 著

石油工业出版社

内 容 提 要

ANSYS 软件是融结构、流体、热、电场、磁场、声场于一体的大型 CAE 通用有限元分析软件。本书详细介绍了海洋环境载荷的基本理论及利用 ANSYS 软件的强大功能对承受环境载荷的海上石油工程结构物进行力学特性计算的分析方法。主要包括隔水导管结构、简易平台桩腿、桩土相互作用、单筒多井结构及大型导管架结平台等。结合实例详细介绍了各种海洋石油结构物的静力、模态及动力有限元分析过程。

本书能够为从事海洋工程及海上石油工程安全评价的研究人员提供指导作用，同时也为有关院校师生提供学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 在海洋石油工程中的应用 / 杨进, 刘书杰, 姜伟等著.

北京: 石油工业出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-5021-7576-4

I. A...

II. 杨...

III. 海上石油开采 - 有限元分析 - 应用程序

IV. TE53 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 234221 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 328 千字

定价: 52.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

海洋石油工程从某种意义上说是一种特殊的石油工程，因为有一层海水的存在使其具有高风险、高成本与高科技的特点。处于海洋环境中的石油结构物承受着极其复杂的载荷情况，合理的设计与计算对于海洋石油的开采有着非常重要的影响。随着计算机技术的发展，有限元技术在海洋石油工程中得到了广泛的应用。ANSYS 软件作为一种大型 CAE 通用有限元分析软件，在海洋石油工程诸多方面都能够发挥优势作用。但是目前还未见有专门介绍 ANSYS 软件在这方面应用的书籍。因此，作者结合近些年来所从事的科研项目中的—些工程实际问题，系统地介绍了 ANSYS 软件在海洋石油工程中应用的基本理论、工程应用实例等问题。

本书以实际工程实例为主导，向读者系统地介绍了基于 ANSYS 软件在海洋石油工程结构物分析中的应用。在内容组织上分为理论基础篇和工程实例篇两大部分。在理论基础篇中介绍了包括海洋环境载荷基本理论和海洋结构物分析过程中所用到的 ANSYS 单元及本书中所涉及的结构分析方法，目的在于让读者不仅学会如何利用软件对结构物进行分析，还对结构物所承受的环境载荷理论有一定程度的熟悉和掌握。在工程实例篇中介绍了包括海洋石油工程结构物中比较典型的工程结构物，如钻井隔水导管、简易平台桩腿结构、桩土相互作用、单筒多井结构及大型导管架结平台等内容。

从内容安排上遵循从简单到复杂的顺序，首先结合简单的隔水导管问题，向读者详细介绍 ANSYS 的静力分析过程，逐步深入地将 ANSYS 的非线性问题、模态分析、瞬态动力分析等问题通过具体实例进行详细的讲述。在对工程实例进行 ANSYS 分析操作时，将 ANSYS 窗口操作及 APDL 命令流相结合，让读者同时了解这两种操作方式的联系与区别，每个工程实例都附有完整的 APDL 命令流，为方便读者在学习完本书之后，如果要进行相类似的工程问题分析时，可以直接应用部分命令流，为读者节省时间。

在本书编写过程中，中海石油（中国）有限公司钻完井办公室的董星亮、谢梅波、张春阳、周俊昌等同志提供了大量的技术指导，中海石油（中国）有限公司北京研究中心侯金林、王平双、周建良、何保生、李嗣贵、曹砚峰、辛雪松等同志提供了软件平台和技术指导，天津分公司刘良跃、邓建明、赵景芳、范白涛、马英文、张晓晟、刘鹏、许杰等同志提供了大量渤海海域资料 and

现场应用，深圳分公司唐海雄、韦红术、汪顺文、张俊斌、林海春、苏峰等同志提供了大量南海东部现场资料和指导，湛江分公司谢玉洪、李中、张勇、黄凯文、黄熠、段泽辉、郭永宾、方满宗等同志提供了大量的南海西部海域资料和现场应用，上海分公司郭士生、罗勇等同志提供了大量东海海域资料和现场应用，中海油海洋工程有限公司崔玉军、杨晓刚等同志提供了大量导管架平台资料和现场应用指导，在此表示衷心感谢。

另外，十分感谢 ANSYS 软件研发和经销商，为解决海洋石油工程问题提供了优秀的计算分析平台，为本书的出版提供了必要的条件。

由于本书涉及内容较多，加之编者的水平有限，本书定有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 ANSYS 软件概述	1
1.1.1 ANSYS 的发展历史	1
1.1.2 基本功能与分析过程	2
1.2 海洋石油工业发展现状	6
1.2.1 我国海洋石油发展现状	6
1.2.2 海洋结构物的发展历史及应用背景	7
1.2.3 海洋石油工程的研究进展	8

上篇 海洋结构物 ANSYS 分析基础理论

2 环境载荷理论基础	11
2.1 海风载荷	11
2.1.1 设计风速	11
2.1.2 风力表达式	12
2.2 海流载荷	13
2.2.1 海流分类	13
2.2.2 海流计算	13
2.3 波浪力	15
2.3.1 波浪力分类	15
2.3.2 波浪力计算	15
2.4 海冰载荷	17
2.4.1 海冰载荷的研究方法	17
2.4.2 海冰力计算	19
2.5 地震作用	21
2.5.1 地震作用理论	21
2.5.2 ANSYS 地震分析方法	23
2.6 本章小结	23
3 ANSYS 结构有限元分析基础	24
3.1 海洋结构物分析常见的 ANSYS 单元类型介绍	24
3.1.1 PIPE16 单元特性介绍	24
3.1.2 PIPE20 单元特性介绍	27
3.1.3 PIPE59 单元特性介绍	29
3.1.4 BEAM4 单元特性介绍	33
3.1.5 SHELL43 单元特性介绍	37
3.1.6 COMBIN39 单元特性介绍	37

3.1.7	SOLID45 单元特性介绍	38
3.1.8	MASS21 单元特性介绍	39
3.2	ANSYS 结构分析基本类型	39
3.2.1	结构静力分析	39
3.2.2	结构模态分析	42
3.2.3	瞬态动力学分析	44

下篇 工程实例篇

4	钻井隔水导管结构静力分析	49
4.1	钻井隔水导管概述	49
4.1.1	隔水导管力学分析模型	49
4.1.2	隔水导管的 ANSYS 有限元分析步骤	49
4.2	工程实例：浅海水域隔水导管结构静力分析	50
4.2.1	前处理	50
4.2.2	求解计算	56
4.2.3	结果分析	60
4.3	波浪相位角搜索实例	64
4.3.1	基本过程	64
4.3.2	实例分析	65
4.4	本章小结	65
5	平台桩腿与海底土相互作用模拟	70
5.1	桩土相互作用概述	70
5.2	P — y 曲线理论	71
5.2.1	软黏土中的 P — y 曲线	71
5.2.2	砂土中的 P — y 曲线	72
5.2.3	硬黏土中的 P — y 曲线	74
5.3	P — y 曲线法的 ANSYS 实现	74
5.4	工程实例：平台桩土相互作用分析	75
5.4.1	前处理过程	76
5.4.2	静力求解计算	80
5.4.3	结构模态分析	85
5.5	本章小结	89
6	隔水导管抗冰极限承载力分析	95
6.1	隔水导管结构概述	95
6.2	工程实例：隔水导管抗冰极限承载力弹塑性分析	95
6.2.1	模型简化	96
6.2.2	前处理	96
6.2.3	求解计算	108
6.2.4	结果分析	111
6.3	本章小结	122

7	单筒三井简易平台桩腿结构力学分析	128
7.1	单筒三井结构概述	128
7.2	工程实例：单筒三井结构平台桩腿动力分析	129
7.2.1	模型建立	130
7.2.2	静力分析求解	134
7.2.3	动力分析	137
7.3	本章小结	143
8	深水隔水导管与导向孔相互作用分析	149
8.1	隔水导管导向孔简述	149
8.2	工程实例：某油田隔水导管与导向孔相互作用研究	150
8.2.1	模型建立	150
8.2.2	静力分析	153
8.2.3	结构模态分析	160
8.3	本章小结	163
9	导管架平台整体结构分析	168
9.1	平台整体模型建立	169
9.1.1	工程实例基本数据	169
9.1.2	导管架平台结构特点	169
9.1.3	平台几何模型的建立	170
9.1.4	平台有限元模型划分	173
9.2	波流耦合作用下导管架平台整体结构静力分析	173
9.2.1	波流耦合力极值	173
9.2.2	结构整体静力分析	175
9.2.3	静力结果分析	175
9.3	导管架平台整体结构模态分析	177
9.3.1	结构模态计算	177
9.3.2	观察模态分析结果	178
9.4	波浪作用下平台结构瞬态动力分析	180
9.4.1	瞬态动力分析	180
9.4.2	动力分析结果处理	181
9.5	本章小结	183
	参考文献	198

1 绪 论

◇ 本章导读

学习 ANSYS 软件之前, 首先需要对该软件有一个比较清楚的认识, 本章将对 ANSYS 软件进行简要的概述, 接着对目前海洋石油工程的发展进行介绍。目的是使读者在了解 ANSYS 软件的同时对海洋石油的发展有一个更深刻的认识, 为后继的分析奠定基础。

本章主要包括以下两个内容:

- ANSYS 软件概述。
- 海洋石油工业的发展现状。

1.1 ANSYS 软件概述

ANSYS 软件是融结构、流体、热、电场、磁场、声场于一体的大型 CAE 通用有限元分析软件。由美国 ANSYS 软件公司开发, 是第一个通过 ISO 9001 质量认证的分析设计类软件, 是美国机械工程师协会 (ASME)、美国核安全局 (NQA) 及近十个专业技术协会认证的标准分析软件, 广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究。功能强大、使用灵活。该软件可在大多数计算机及操作系统 (如 Windows、UNIX、Linux) 中运行, 从 PC 机到工作站直至巨型计算机, ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。它开发了第一个集成的计算流体动力学 (CFD) 功能, 也是第一个且是唯一一个开发了多物理场分析功能的软件。ANSYS 多物理场耦合的功能, 允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算, 例如, 热—结构耦合、磁—结构耦合以及电—磁—流体—热耦合, 在 PC 机上生成的模型同样可运行于巨型计算机上, 这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解。

1.1.1 ANSYS 的发展历史

ANSYS 公司从建立之初到现在, 已有将近 40 年的历史。公司成立于 1970 年, 总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡。近 40 年来, ANSYS 公司一直致力于设计分析软件的开发, 不断吸取新的计算方法和计算技术, 领导着世界有限元技术的发展, 并为全球工业广泛接受, 其用户遍及全世界各地。

ANSYS 软件的第一个版本仅提供了热分析及线性结构分析功能, 像当时的大多数程序一样, 它只能是一个批处理程序, 且只能在大型计算机上运行。

20 世纪 70 年代初, ANSYS 软件中融入了新的技术以及用户的要求, 从而使程序发生了很大的变化, 非线性、子结构以及更多的单元类型被加入到子程序。70 年代末, 交互方式的加入是该软件最为显著的变化, 它大大地简化了模型生成和结果评价。在进行分析之前, 可用交互式图形来验证模型的几何形状、材料及边界条件; 在分析完成之后, 计算结

果的图形显示，立即可用于分析检验。

目前该软件已发展到 ANSYS 11.0 版本，其功能更加强大，使用更加便利。ANSYS 分析模拟工具易于使用、支持多种工作平台。同时该软件提供了一个不断改进的功能清单，包括：结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体动力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变 / 有限元转动功能以及利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 的扩展宏命令功能。

1.1.2 基本功能与分析过程

1.1.2.1 基本功能

ANSYS 软件主要包括三个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型。软件提供了 100 种以上的单元类型，可以用来模拟工程中的各种结构和材料。

分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。

后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示等图形方式显示，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

启动 ANSYS，进入主界面（见图 1.1）以后，程序停留在主程序界面。从主菜单可以进入各处理模块：PRE7（通用前处理模块），SOLUTION（求解计算模块），POST 1（通用后处理模块），POST26（时间历程后处理模块）。ANSYS 用户手册的全部内容都可以联机查阅，可以通过 ANSYS 帮助系统查看所有的单元介绍、基本原理等信息。

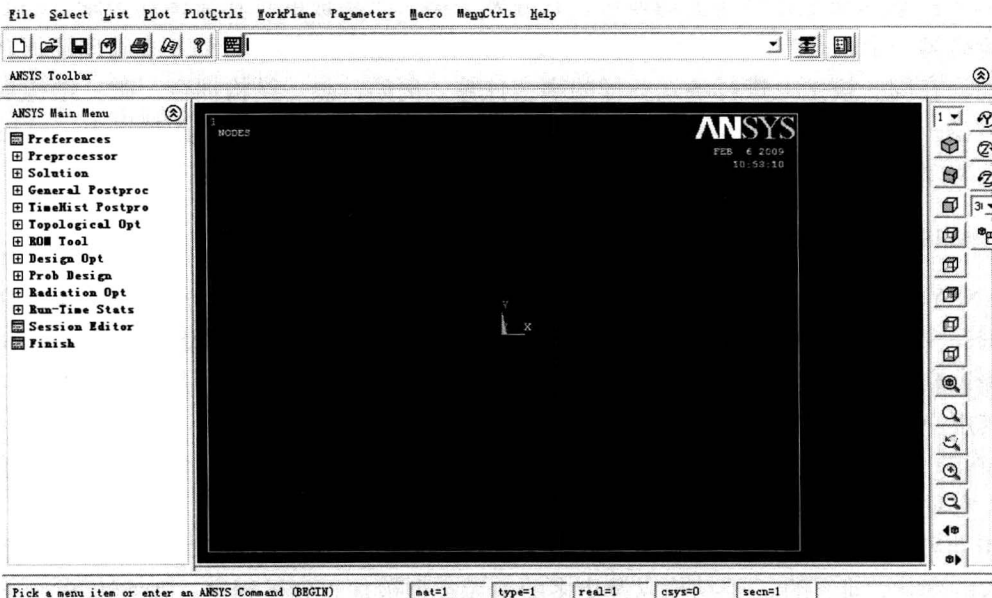


图 1.1 ANSYS 主界面

用户的指令可以通过鼠标单击菜单项选取和执行,也可以在命令输入对话框通过键盘输入。命令一经执行,该命令就会在 LOG 文件中列出,打开输出对话框可以看到 LOG 文件的内容。如果软件运行过程中出现问题,查看 LOG 文件中的命令流及其错误提示,将有助于快速发现问题的根源。LOG 文件的内容可以略作修改存到一个批处理文件中,在以后进行同样工作时,由 ANSYS 自动读入执行,这是 ANSYS 软件的第二种命令输入方式。这种命令方式在进行某些重复性较高的工作时,能有效地提高工作速度。软件提供了 100 种以上的单元类型,用来模拟工程中的各种结构和材料。

1.1.2.2 分析过程

了解 ANSYS 的基本知识之后,下面就来介绍在 ANSYS 中进行结构有限元分析的一般流程。一般地,一个完整的 ANSYS 结构分析过程包括下面一些基本操作和环节。

(1) 前处理过程。

前处理是整个分析过程的开始阶段,其目的是在于建立一个符合工程实际情况的结构有限元分析模型,为后继的分析创建对象。双击实用菜单中的【Preprocessor】,进入 ANSYS 的前处理模块。这个模块主要包含如下几个操作环节。

① 分析环境设置。

进入 ANSYS 分析环境界面后,指定分析的工作名称以及图形显示的标题,开始一个新的结构分析。

② 定义单元类型、实常数及材料模型。

定义在分析过程中需要用到单元类型,对于单元类型的选择,一般要结合工程实际情况及 ANSYS 单元库相应单元的属性进行选择,遵循所选择的单元类型要能够反映实际问题特性的原则。单元类型定义完成后,需要设置相关的单元实常数(如:梁单元的横截面积、惯性矩,管单元的外径、壁厚等),指定分析中所用到的材料模型以及相关的材料参数(如:弹性模量、泊松比、密度、屈服极限等)。

③ 建立几何模型及网格划分。

建立几何模型就是要建立一个与实际结构外形大致相同(程度由结构的简化原则而定)的几何图形元素组合体。ANSYS 程序提供了两种实体建模方法:自顶向下模式与自底向上模式。

自顶向下进行实体建模时,用户定义一个模型的最高级图元,如球、棱柱,称为基元,程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型,如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱体结构。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模,用户均能使用布尔运算来组合数据集,从而得到一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算,诸如相加、相减、相交、分割、黏结和重叠。在创建复杂实体模型时,对线、面、体、基元的布尔操作能减少大量的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动和拷贝实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造,通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成,用于网格划分的硬点的建立、移动、拷贝和删除等操作。

自底向上进行实体建模时,用户从最低级的图元向上构造模型,即:用户首先定义关键点,然后依次是相关的线、面、体。ANSYS 程序提供使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分功能,包括四种网格划分方法:延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划

分。延伸网格划分可将一个一维网格延伸成一个二维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分，然后选择合适的单元属性和网格控制，生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分器功能是十分强大的，可对复杂模型直接划分，避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动地生成有限元网格，分析、估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格的离散误差，直到误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

④定义边界条件及约束条件。

在上述的有限元模型上，引入实际结构中的边界条件，自由度之间的耦合关系以及其他的一些约束条件。

注意：定义边界条件及约束条件也可以在求解模块中设置。另外，在 ANSYS 建模过程中，也可以直接由建立节点的方式直接建立单元模型。

(2) 求解过程。

前处理阶段完成建模以后，用户可以在求解阶段获得分析结果。单击快捷工具区的【SAVE DB】将前处理模块生成的模型存盘退出【Preprocessor】，单击实用菜单项中的【Solution】进入分析求解模块。在该阶段，用户可以定义分析类型、分析选项、载荷数据和载荷步选项，然后开始有限元求解。

①设定分析类型。

ANSYS 软件提供的分析类型如下。

结构静力分析：用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析，而且也可以进行非线性分析，如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析。

结构动力学分析：结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力分析不同，动力分析要考虑随时间变化的力载荷以及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行的结构动力学分析类型包括：瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

结构非线性分析：结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。ANSYS 程序可求解静态和瞬态非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。

动力学分析：ANSYS 程序可以分析大型二维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时，可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性，确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

热分析：程序可处理热传递的基本类型为传导、对流和辐射。热传递的两种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程的相关分析能力以及模拟热与结构应力之间的热—结构耦合分析能力。

流体动力学分析：ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析，分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率，并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外，还可以使用二维表面效应单元和热—流管单元模拟结构的流体绕流，包括对流换热效应。

对于上述众多分析类型，在实际分析中可以根据问题的性质选择不同的分析类型。下面列出常见的结构分析类型及类型编号，如表 1.1 所示。

表 1.1 ANSYS 结构分析类型

数字代码	分析类型
0	STATIC (静力分析)
1	BUCKLE (屈曲分析)
2	MODAL (模态分析)
3	HARMIC (谐载荷响应分析)
4	TRANS (瞬态动力分析)
5	SUBSTR (子结构分析)
6	SPECTR (谱分析)

在选定分析类型后，需要设置相关的参数，比如分析所用到的求解器类型、非线性选项和迭代次数设置、模态分析的模态提取方法和模态扩展数等各种分析选项。

②定义载荷信息。

ANSYS 结构分析的载荷包括位移载荷、集中力（包括弯矩）、表面载荷、体积载荷、惯性力以及耦合场载荷（如热应力）等。可以将结构分析的载荷施加到几何模型上或者有限元模型上。

施加在几何模型上的载荷是独立于有限元网格的，当在划分网格时，是不会影响到已经施加的载荷的。施加到有限元模型上的载荷网格修改时将会失效，需要删除先前的载荷并在新的网格上重新定义载荷。对于施加在几何实体模型上的载荷，ANSYS 程序自动将其转换到有限元模型上进行求解。

③求解计算。

在施加了载荷并设置了相关的分析选项之后，即可调用求解程序开始求解。在求解过程中，可以通过屏幕窗口获取计算过程的一些相关信息，诸如载荷步、收敛曲线等。

(3) 后处理过程。

ANSYS 软件的后处理过程包括两个部分：通用后处理模块 POST1 和时间历程响应后处理模块 POST26。通过友好的用户界面，可以很容易获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等，输出形式可以有图形显示和数据列表两种。

①通用后处理模块 POST 1。

单击菜单项中的【General Postproc】选项即可进入通用后处理模块。此模块能对前面的分析结果以图形方式显示和输出，例如，计算结果（如应力）在模型上的变化情况可用等值线图表示，不同的等值线颜色，代表了不同的值（如应力值）。用不同的颜色代表不同的数值区（如应力范围），清晰地反映了计算结果的区域分布情况。

②时间历程响应后处理模块 POST 26。

单击实用菜单项中的【TimeHist Postprc】选项即可进入时间历程响应后处理模块。这个模块用于检查在一个时间段或一个子步历程中的结果，如节点位移、应力或支座反力。这些结果能通过绘制曲线或列表查看，绘制一个或多个变量随频率或其他量变化的曲线，

有助于形象化地表示分析结果。另外, POST26 还可以进行曲线的代数运算。

综上所述, 对 ANSYS 结构分析的基本过程进行了简单的介绍, 希望读者能够对 ANSYS 分析的基本过程有一个初步的认识。

1.2 海洋石油工业发展现状

据统计, 世界海洋石油资源量占全球石油资源总量的 34%, 全球海洋石油蕴藏量约 $1000 \times 10^8 \text{t}$, 其中已探明的储量约为 $380 \times 10^8 \text{t}$ 。目前全球已有 100 多个国家在进行海上石油勘探。根据国际能源署 (IEA) 统计: 2003 年世界海洋石油生产量达 $12.57 \times 10^8 \text{t}$, 约占世界石油总生产量的 34.1%, 1992 年世界海洋石油生产量所占份额为 26.5%, 2002 年提高到 34%。2003 年世界海洋石油生产量比上年增长 3.7%, 高于世界石油生产量 3.5% 的增长率。1992—2002 年世界石油生产量年均增长率为 1.1%。在 3.7% 的增长速度下, 世界海洋石油产量的增长速度是世界石油生产总量增速的 3 倍多。但是, 另一方面全球的石油需求量增长更为迅猛。

目前, 全球油气储量增长乏力, 远远无法弥补每年的产量, 然而全球的石油消费量仍将以较快的速度增长。未来巨大的油气需求将如何得以满足, 这是摆在世界石油工业面前的一个大难题。根据 BP2005 年能源统计资料, 全球对于石油的需求正在强劲增长。1981 年的石油消费量为 $29.9 \times 10^8 \text{t}$, 而到 2004 年已达到 $40.4 \times 10^8 \text{t}$ 。而且, 根据国际能源署 (IEA) 发布的世界能源展望预测, 2000—2030 年, 世界石油需求预计年均增长 1.6%, 其中到 2030 年达到 $57.69 \times 10^8 \text{t}$ 。未来油气仍将在世界一次能源需求中居主导地位, 到 2030 年油气需求占世界一次能源总需求的 65%, 2030 年 $99.72 \times 10^8 \text{t}$ 油当量的油气需求要得以满足, 再加上陆上石油资源危机问题日渐突出, 因此急需寻找储量的接替区域, 而未来石油界的希望应该在海上。

1.2.1 我国海洋石油发展现状

我国从 1993 年开始, 原油供应量满足不了市场需求, 因而从石油出口国变为石油进口国。2005 年我国的原油进口量已达到 $9000 \times 10^4 \text{t}$, 石油已成为我国的稀缺能源。为满足国民经济和社会发展的需要, “十一五” 期间将进一步加强石油天然气资源的勘探, 增加后备储量, 扭转探明储量入不敷出和石油产量徘徊的局面。石油天然气资源是发展石油工业的前提条件和基础, 探明储量是制定石油工业长期发展规划和建设项目的依据, 剩余可采储量的多少决定了石油工业发展潜力所在。目前我国陆上石油后备资源严重不足, 原油产量增长缓慢。由于长期的强化开采, 大多数主力油田在基本稳定基础上陆续进入产量递减阶段, 开采条件恶化, 开发难度增大。受各种因素影响, “九五” 和 “十五” 探明石油储量都没有完成计划, 石油可采储量年增长量小于当年采出量, 油气资源的接替依然紧张。因此, 在 “十一五” 期间, 将继续加强石油天然气资源勘探, 增加后备储量。鉴于陆上资源的日渐枯竭, 资源开发向海洋、尤其是深海进军已成必然趋势。

我国海洋石油工业开始于 20 世纪 60 年代末期, 最早的海洋石油开发起步于渤海湾地区, 该地区典型水深约为 20m。到了 80 年代末期, 在南中国海的联合勘探和生产开始在 100m 左右水深的范围内进行。现在我国也准备加快南中国海油气资源的勘探开发, 但这一海域水深在 500 ~ 2000m, 而我国目前还不具备在这样水深海域进行油气勘探和生产的

技术,因此迫切需要发展深海油气勘探和开发技术。鉴于此,由国家发展改革委员会牵头,组织中石油、中石化、中海油三大公司参与,投入大量资金,共同研究深海海洋油气开发技术。目前,中石油已获批准在南中国海 $12 \times 10^4 \text{km}^2$ 的海域勘探和开发油气资源,并以辽河油田和大港油田为基地成立了海洋石油工程公司。中海油也已获批准在南中国海 $7 \times 10^4 \text{km}^2$ 的海域勘探和开发油气资源,并且已有 8 个区块开始向全球招商,积极寻求外部合作。另外,其子公司中海油服股份分公司也投入巨资开始建造深水钻井平台,并正积极准备建造 1500m 作业水深的半潜式平台。

我国深海水域海洋石油资源丰富。据美国能源信息署报道,在南中国海拥有丰富的油气资源,被称为另一个波斯湾。对南中国海油气资源量的估算中外差距较大,1993 年美国地质调查局对南中国海地区海上盆地的资源所做的估计为:石油 $280 \times 10^8 \text{bbl}$,天然气 $266 \times 10^{12} \text{m}^3$;而其他西方国家乐观的估计仅为:石油 $100 \times 10^8 \text{bbl}$,天然气 $35 \times 10^{12} \text{m}^3$;而我国的估计为:石油 $1050 \times 10^8 \text{bbl}$,天然气 $2000 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。最有潜力的含油气盆地曾母暗沙盆地、万安盆地、南徽盆地和东纳土纳盆地。目前在南中国海地区的大多数国家均有油气发现,估计探明的石油储量约 $77 \times 10^8 \text{bbl}$,天然气储量约 $4.36 \times 10^{12} \text{m}^3$,石油产量约 $175 \times 10^4 \text{bbl/d}$,天然气产量约 $710.33 \times 10^8 \text{m}^3/\text{d}$ 。印度尼西亚、菲律宾、马来西亚和越南都在南中国海地区有重要的油气发现。

1.2.2 海洋结构物的发展历史及应用背景

地球上 71% 的表面被海洋所覆盖。对于人类来讲,海洋是一个巨大的财富,尤其是伴随着工业的发展,人们对能源的需求量与日俱增,陆地上有限的能源已逐渐不能满足人类的需求,因此,开发海洋资源已成为人们的当务之急。

1896 年,美国人以线桥连陆方式在加利福尼亚距海岸 200 多米打出了第一口海上油井,它标志着海上石油工业的诞生。到了 20 世纪 40 年代成功建造了第一座专门用于海洋石油钻探开采的平台,工作水深只有 7m。这项技术进一步使得海上石油工业出现了突飞猛进的发展。到了 1979 年全世界近海共有 7000 余座固定式海洋石油钻探生产平台。

第二次世界大战后,海洋石油钻探开采技术突飞猛进,可开发深度越来越深,并能在各种复杂的海况下开采石油。20 世纪 50 年代以后,成功研制了各种移动式钻井平台,克服了固定式平台不能重复使用的缺点,并大大增加了工作水深。移动式海洋石油钻井设备拥有自己的浮力结构,可以有拖船拖着移动,有的还用自己的动力设备,可以自航。固定式平台固定在海底,工作水深受限。移动式平台使用锚缆定位和动态定位,工作深度可达到 200m 以上,但是稳定性较差。为了向深水石油开发进军,各国竞相研究稳定又廉价的深水平台。张力腿平台用绷紧的钢索系留,工作水深可达到 600 ~ 900m。

进入 20 世纪 70 年代,海上石油平台数量猛增,特别是半潜式平台。1965 年还只有 70 座,截至 1976 年浮动石油平台已超过 350 台,遍布世界各个沿海区域。

随着石油平台数量的增加,海洋石油产量也随之增加。到 20 世纪 80 年代中期,海洋石油产量已占世界石油产量的三分之一。截至目前,海洋石油产量在世界石油产量中的百分比还在增加。此外,随着海洋开发事业的迅速发展,海洋平台得到广泛的应用,如海上石油钻井、海上施工、生活、地质勘察、海底管道铺设、海上起重、海上打桩、机场、海上工厂等都可以采用海洋平台。

注: $1 \text{bbl} = 0.159 \text{m}^3$ 。

1.2.3 海洋石油工程的研究进展

随着海洋石油的发展,近几年围绕着海洋石油生产中出现的若干问题,我国工程界积极开展相应的研究工作,在环境、载荷、结构、检验、维修工艺以及海洋工程设备等方面取得了长足的进展,海洋石油的开采技术已有很大提高,开采的范围也逐渐从浅海向深海发展,并正在以下几个方面进行深入的研究。

(1) 深海石油平台技术的研究。

深海石油平台的设计、建造及相关技术是深海油气资源开发中的关键技术之一,了解和掌握国外深海平台的建造和使用情况,探讨国外深海平台设计和使用中积累的经验,对我国海洋油气开发具有重要意义。对深水开采,钢质导管架平台的造价会随水深增加而急剧增长,以致在经济上不可行。这就促使在深海开发中使用新的结构形式,如混凝土结构和浮式结构。典型的浮式结构是 FPSO、半潜式平台、张力腿平台(TLP)和 SPAR 平台。

目前,我国海洋工程界对 FPSO 与半潜式平台的了解较多,技术也相对成熟。而对 TLP 和 SPAR 平台却了解较少,也没有设计、建造和使用的经验。因此,目前的研究重点将是 TLP 和 SPAR 平台,研究的内容主要有:平台的环境载荷计算及环境参数选取;平台的稳定性与运动;平台的结构强度与有限元技术;平台的结构疲劳强度与断裂;平台的检验技术等。

(2) 推动风险分析与综合安全评估技术在生产及检验中的应用。

海洋石油结构物复杂、体积庞大、造价昂贵,所处的海洋环境十分复杂和恶劣,风、海浪、海流、海冰和潮汐时时作用于结构,同时还受到地震作用的威胁。在此环境条件下,环境腐蚀、海生物附着、地基石冲刷和基础动力软化、材料老化、构件缺陷和机械损伤以及疲劳和损伤累积等因素,都将导致平台结构构件和整体抗力的衰减,影响结构的服役安全度和耐久性。另外,操作不当、管理不当等人为因素也直接影响海洋石油平台的安全性。随着对海洋平台复杂性的深入了解,越来越认识到海洋结构物结构性和系统性风险分析的必要性。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。例如,1965 年英国北海的“海上钻石”号钻井平台支柱拉杆脆性断裂导致平台沉没;1968 年“罗兰角”(Rowlandhorn)号钻井平台事故;1969 年我国渤海 2 号平台被海冰推倒,造成直接经济损失 2000 多万元;1997 年渤海 4 号烽火平台倒毁;1980 年北海 Ekofisk 油田的 Alexander L Kielland 号五腿钻井平台发生倾覆,导致 122 人死亡;以及 2001 年巴西油田的 P-36 平台发生倾覆。这些惨痛的教训给海洋资源开发以很大的警示,同时也促使国内外石油部门更加努力地研究海洋平台安全管理的关键科学问题。

因此,我国正积极准备开展对海洋平台的各种风险进行分析、识别及评估,确定风险控制方案,保证平台安全生产,并最终在费用和收益之间达到协调,这将为我国海洋油气资源的安全开采提供科学可靠的保证。平台风险分析与综合安全评估的目标就是要发展一种基于风险分析的、结构化的系统方法,目的是要全面地、综合地考虑影响安全的诸方面因素,除考虑平台结构的检测、维护和管理,还要考虑如何从组织管理上、设备管理上、制度管理上、人为因素以及操作规程上保证平台的安全运行。研究如何对海洋平台的各种危险进行识别、评估,并通过风险评估、费用和收益评估,提出合理的并能有效地控制风险的措施,从而进一步确定风险控制方案,在费用和收益之间达到协调,并最终为决策者提出意见和建议。

上 篇

海洋结构物

ANSYS 分析基础理论