

# 海洋平台结构单重及优化

徐勤宇

海洋石油工程股份有限公司 天津 300451

**摘要：**本文全面介绍了海洋平台结构的分类、组成及工作环境，详细阐述了海洋平台结构单重的计算方法与原则，包括理论计算法和经验估算法。在结构优化设计方面，探讨了结构重量最轻化的目标以及拓扑优化、尺寸优化和形状优化三种方法。同时，介绍了优化设计软件在海洋平台结构优化中的应用，以及优化设计的基本步骤。本文的研究成果为海洋平台结构的轻量化、高强度和耐久性设计提供理论支持和技术参考。

**关键词：**海洋平台；结构单重；结构优化

## 1 海洋平台结构概述

### 1.1 海洋平台分类

海洋平台按其结构特性和工作状态主要分为固定式、活动式和半固定式三大类。固定式平台的下部由桩、扩大基脚或其他构造直接支承并固着于海底，按支承情况又可细分为桩基式和重力式两种。桩基式平台通过桩基础将平台重量传递至海底土层，适用于各种水深和地质条件，是海洋平台中最常见的形式。重力式平台则依靠自身重量维持稳定，适用于较深海域和密实的砂土地基。活动式平台浮于水中或支承于海底，能在一井位移至另一井位，按支承情况可分为着底式和浮动式两类。着底式平台如坐底式平台，具有沉浮功能，适用于水深较浅且海底平坦的场合。浮动式平台则包括钻井船和半潜式平台等，它们在漂浮状态下进行作业，对风浪等环境条件具有较高的适应性，能在较深海域和恶劣海况下工作。半固定式海洋平台是近年来研究发展的新型平台，它既能固定在深水中，又具有可移性。张力腿式平台即属此类，通过张力腿系统保持平台的稳定性，适用于深水海域。

### 1.2 海洋平台结构组成

海洋平台结构通常由上部结构、基础结构和附属设施三部分组成，上部结构主要包括平台甲板及其上的钻采装置、动力设备、生活设施等，为海上作业提供必要的场地和空间。平台甲板一般设计为多层结构，以容纳各种设备和人员生活所需。基础结构是海洋平台的重要组成部分，它负责将平台重量和作业载荷传递至海底地基。对于固定式平台，基础结构包括导管架和桩基础。导管架由钢质桁架结构组成，通过水平横撑与斜撑加强强度，桩基础则通过导管架打入海底土层，提供稳定的支承。重力式平台的基础则是由大沉垫或分离式舱室组成，依靠自身重量维持稳定。活动式平台的基础结构则

根据其类型有所不同。坐底式平台的基础为沉垫，通过向沉垫内灌水使其下沉至海底。自升式平台则通过桩腿和升降机构实现平台的升降和移动。半潜式平台和钻井船则依靠其浮力在水面漂浮，通过锚泊系统或动力定位系统维持位置稳定。附属设施包括直升机甲板、火炬臂、生活楼、救生设备等，为海上作业提供必要的支持和安全保障。直升机甲板便于人员和设备的快速转移，火炬臂用于紧急情况下燃烧多余或不合格的气体，生活楼提供舒适的生活环境以满足人员长期居住需求，救生设备则确保在紧急情况下人员的安全撤离。

### 1.3 海洋平台工作环境及载荷

海洋平台的工作环境极为复杂多变，面临着风、浪、流、冰、地震等多种自然环境的挑战。风速的变化和风向的不定，对平台的稳定性产生直接影响。海浪的冲击和涌动，不仅增加平台的动力响应，还可能引起结构的疲劳损伤。潮流的作用导致平台产生水平位移和倾斜，影响作业安全和结构完整性。在寒冷海域，冰的撞击和挤压对平台结构构成严重威胁。地震作为突发性自然灾害，对平台的抗震性能提出极高要求。海洋平台在工作过程中还需承受各种载荷的作用，主要包括结构自重、设备载荷、环境载荷和使用载荷等。结构自重是平台自身材料和构件的重量，是设计的基础。设备载荷包括钻井设备、采油设备、动力设备等的重量和工作时产生的动载荷<sup>[1]</sup>。环境载荷包括风载荷、波浪载荷、流载荷、冰载荷和地震载荷等，是平台设计中最需关注的因素之一。使用载荷则包括人员活动、货物运输、设备维护等产生的载荷。在海洋平台的设计中，必须充分考虑各种工作环境和载荷的影响，通过合理的结构设计和优化，确保平台的安全性和可靠性。结构分析、疲劳分析、极限承载力分析等方法的运用，有助于评估平台的性能并采取相应的改进措施。

## 2 海洋平台结构单重计算

### 2.1 结构单重计算原则

海洋平台结构单重计算是确保平台设计安全性、稳定性和经济性的关键环节。其计算原则主要包括以下几点：（1）准确性与可靠性：所有计算必须基于准确的工程数据和科学的方法，确保结果的可靠性。结构单重计算涉及平台的各个组成部分，包括甲板、立柱、浮筒、框架系统等，每一个部分的重量都必须精确计算，以确保整体设计的合理性。（2）全面性与系统性：计算必须涵盖平台的所有结构部分，包括钢材、设备、管线、舾装等，以及这些部分的相互作用。系统性的计算方式可以确保所有相关因素都被考虑在内，避免遗漏导致的设计缺陷。（3）经济性与优化：在确保安全性和稳定性的前提下，计算应考虑经济性，通过优化结构设计，减少不必要的材料使用，降低建造成本。这要求在设计阶段就进行多次迭代计算，找到最优的设计方案。（4）规范与标准：计算应遵循相关的行业规范和标准，如国际海事组织（IMO）、美国石油学会（API）等发布的规范，确保设计符合国际安全标准。（5）灵活性与适应性：海洋平台往往需要在不同的工况下运行，如作业工况、迁移工况、极端风暴工况等，计算应考虑这些工况下的重量变化，确保平台在各种情况下都能保持稳定。

### 2.2 计算方法

#### 2.2.1 理论计算法

根据结构材料的密度、体积等物理参数，直接计算各部分结构的重量。例如，甲板的重量可以通过其面积、厚度和钢材密度来计算；利用有限元软件，对平台结构进行三维建模，通过模拟和分析，计算各部分结构的重量和应力分布。这种方法可以更精确地考虑结构的复杂性和非线性因素。

#### 2.2.2 经验估算法

根据相似平台的经验数据，估算各部分结构的重量比例，然后乘以总重量得到各部分的具体重量。这种方法简单易行，但准确性取决于经验数据的可靠性；将平台结构分解为多个分项，如钢材、设备、管线等，根据各分项的特性和经验数据，分别计算其重量，然后求和得到总重量。这种方法相对更准确，但需要更多的数据和计算工作。

### 2.3 计算步骤

海洋平台结构单重的计算步骤通常包括以下几个阶段：（1）数据收集与准备：收集平台设计所需的所有数据，包括结构尺寸、材料类型、设备型号等。这些数据是进行后续计算的基础。（2）结构划分与建模：将平台

结构划分为多个部分，如甲板、立柱、浮筒等，并对每个部分进行三维建模。建模过程中，需要考虑结构的复杂性和非线性因素，以确保计算的准确性。（3）重量计算与分配：根据建模结果，计算每个部分的重量，并分配到相应的结构单元上。对于复杂结构，可能需要采用有限元分析法进行精确计算<sup>[2]</sup>。（4）重量汇总与校验：将所有部分的重量进行汇总，得到平台的总重量。同时，需要对计算结果进行校验，确保数据的准确性和合理性。（5）优化与调整：根据计算结果，对平台结构进行优化和调整，以减少不必要的材料使用，降低建造成本。优化过程中，需要考虑平台的稳定性、安全性和经济性等多个因素。（6）最终报告与审核：编写最终的计算报告，详细记录计算过程、结果和优化方案。报告应提交给相关部门进行审核，以确保设计符合行业规范和标准。

## 3 海洋平台结构优化设计

### 3.1 结构重量最轻

在保证结构安全的前提下，通过优化设计减少材料用量，可以显著降低平台的制造成本、运输费用和安装难度。同时，轻量化还有助于提高平台的动态响应性能，降低能耗，延长使用寿命。因此，在优化过程中，应充分考虑结构的整体性能，通过调整结构布局、材料选择等手段，实现重量的最轻量化。

### 3.2 优化设计方法

海洋平台结构优化设计的方法主要包括拓扑优化、尺寸优化和形状优化三种。（1）拓扑优化：拓扑优化旨在确定结构的最优布局，即在给定的设计空间内，通过改变材料的分布，使结构在满足强度、刚度等约束条件的同时，达到重量最轻。这种方法在概念设计阶段尤为重要，可以为后续详细设计提供指导。（2）尺寸优化：尺寸优化是在结构拓扑已确定的基础上，通过调整结构的尺寸参数（如梁的宽度、高度、厚度等），使结构在满足性能要求的同时，实现重量最轻。尺寸优化通常用于详细设计阶段，是对拓扑优化结果的进一步细化。（3）形状优化：形状优化是在保持结构拓扑和尺寸基本不变的前提下，通过调整结构的形状（如改变壳体的曲率、调整杆件的截面形状等），提高结构的性能，同时减少材料用量。形状优化更侧重于提高结构的整体性能，如降低应力集中、改善流体动力学性能等。

### 3.3 优化设计软件

在海洋平台结构优化设计过程中，优化设计软件扮演着至关重要的角色。常见的优化设计软件包括有限元分析（FEA）软件（如ANSYS、Abaqus等）、拓扑优化

软件(如OptiStruct等)以及多学科优化软件(如ISAMS等)。这些软件不仅提供了丰富的优化算法和工具,还支持与CAD系统的集成,方便设计人员在优化设计过程中进行模型的创建、修改和验证<sup>[3]</sup>。

### 3.4 优化设计步骤

海洋平台结构优化设计通常遵循以下步骤:(1)明确优化设计目标:明确优化设计的目标,如减轻结构重量、提高承载能力、降低建造成本等。同时,还需要确定优化设计的约束条件,如强度、刚度、稳定性等要求。(2)建立数学模型:根据优化设计目标和约束条件,建立结构的数学模型。这包括确定结构的几何形状、材料属性、载荷条件等。(3)选择优化设计方法:根据问题的复杂性和优化设计目标,选择合适的优化设计方法,如拓扑优化、尺寸优化或形状优化。(4)设定优化设计参数:在优化设计软件中设定优化设计参数,如设计变量的取值范围、优化算法的参数等。(5)运行优化设计程序:运行优化设计程序,进行迭代计算,直到找到满足优化设计目标和约束条件的最优解。(6)验证优化设计结果:对优化设计结果进行验证和分析,确保其满足实际工程需求。如果需要,可以对优化设计进行进一步的调整和优化。(7)编写优化设计报告:编写优化设计报告,详细记录优化设计过程、结果和验证分析情况。报告应清晰、准确地反映优化设计工作的成果和结论。

## 4 海洋平台结构优化的数值模拟技术

### 4.1 有限元分析在结构优化中的应用

有限元分析(FEA),作为一种强大的数值模拟技术,已成为海洋平台结构优化的核心工具。通过这一技术,工程师们能够将复杂的海洋平台结构离散化为由许多相互连接的小单元组成的网格,进而求解这些单元在特定载荷条件下的力学响应。首先,有限元分析为设计人员提供了精确的结构响应预测能力。通过模拟各种工况下的载荷条件,如极端天气、海流冲刷和波浪冲击等,设计人员可以评估平台结构的应力分布、变形模式和疲劳寿命。这些数据是优化结构设计和材料选择的基础,帮助确保平台在生命周期内能够安全、稳定地运行;其次,有限元分析还用于验证优化方案的有效性。在结构优化的初步阶段,设计人员可能会提出多种不同的设计方案。通过有限元分析,可以对这些方案进行逐

一评估,比较它们的性能差异,从而筛选出最优的设计方案。这不仅有助于降低设计成本,还能提高设计的可靠性和效率;最后,有限元分析还支持结构的动态响应分析。在海洋环境中,平台结构经常受到动态载荷的作用,如地震波、风暴潮等。通过有限元分析,可以模拟这些动态载荷对平台结构的影响,评估结构的动态性能和稳定性<sup>[4]</sup>。

### 4.2 多学科优化设计软件平台

多学科优化设计软件平台应运而生,它集成了结构力学、流体动力学、热力学、控制系统等多个学科的优化设计方法和工具,实现了多学科之间的协同优化。这类软件平台的核心优势在于其高度的集成性和协同性。通过统一的用户界面和数据库,设计人员可以在一个平台上完成多学科的设计优化工作。这不仅避免传统设计中各学科之间的信息孤岛和重复工作,还促进了学科之间的交流和合作,提高了设计的整体性能和效率。另外,多学科优化设计软件平台还具备强大的自动化和优化算法;这不仅降低了设计人员的工作负担,还提高设计的准确性和可靠性。

### 结束语

综上所述,海洋平台结构优化设计是一个复杂而系统的过程,涉及多个学科领域的交叉与融合。通过合理的结构单重计算和优化设计方法,结合先进的数值模拟技术和优化设计软件平台,可以实现海洋平台结构的轻量化、高强度和耐久性设计。未来,随着海洋工程技术的不断发展和创新,相信海洋平台结构优化设计将取得更加显著的进展和突破,为海洋资源的开发和利用提供更加安全、可靠和经济的支持。

### 参考文献

- [1]梅华东,胡性涛,文志飞,等.海洋平台结构单重及优化[J].中国海洋平台,2022,37(3):95-99.DOI:10.12226/j.issn.1001-4500.2022.03.20220317.
- [2]王蒙,徐学军,杨风艳,官晨.海洋石油平台脚靴的结构优化设计[J].中国海洋平台,2023,38(01):98-103.
- [3]穆顷,朱本瑞,孙大伟.海洋平台上部组块往复式压缩机支撑结构振动评估[J].中国海洋平台,2023,38(01):37-43.
- [4]吴景健,庞洪林,肖辉,万军.渤海导管架平台外挂井槽对桩基承载力的影响[J].中国海洋平台,2022,37(05):93-97.