

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD13-2018



中国船级社

张力腿平台入级指南 2018

**Guideline for the Classification of Tension Leg
Platform (TLP)**

生效日期：2018年10月1日

北京

目 录

目 录	I
第 1 章 通 则	1
第 1 节 一般规定	1
第 2 节 入级符号	1
第 3 节 定义	1
第 4 节 图纸和资料	4
第 5 节 设计原则	5
第 6 节 水下检验标志	6
第 2 章 稳性和重量控制	7
第 1 节 一般规定	7
第 2 节 稳性	7
第 3 节 重量控制	8
第 4 节 水密和风雨密完整性	9
第 3 章 设计载荷和工况	11
第 1 节 一般规定	11
第 2 节 设计载荷	11
第 3 节 设计工况	12
第 4 节 环境条件	13
第 5 节 平台状态设计工况	14
第 6 节 总体性能和载荷预报	15
第 4 章 下浮体和主要结构	17
第 1 节 一般规定	17
第 2 节 结构用钢和焊缝设计	18
第 3 节 结构防腐	18
第 4 节 结构布置	18
第 5 节 关键连接结构设计和分析	19
第 6 节 下浮体部分的构件尺寸	19
第 7 节 张力腿平台结构强度	23
第 8 节 非整体式甲板结构强度	27
第 5 章 张力腿系统	29
第 1 节 一般规定	29
第 2 节 设计原则	30
第 3 节 工况	30
第 4 节 张力筋腱分析	30
第 5 节 张力筋腱的最大和最小张力	31
第 6 节 筋腱管子	32
第 7 节 筋腱部件	32
第 8 节 疲劳分析	32
第 9 节 防腐	33
第 6 章 海底基础	34

第 1 节 一般要求.....	34
第 2 节 场地调查.....	34
第 3 节 基础设计.....	34
第 4 节 基础安装.....	35
第 7 章 机械和其他系统	36
第 1 节 轮机管系.....	36
第 2 节 电气装置.....	37
第 3 节 自动化、安全与通讯.....	37
第 4 节 消防系统及设备.....	37
第 5 节 机械和设备.....	37
第 6 节 平台综合监控系统.....	38
附录 A 张力腿平台总体性能和水动力载荷分析参考方法	39
第 1 节 概述.....	39
第 2 节 水动力分析方法.....	39
第 3 节 其他环境载荷.....	44
第 4 节 结构水动力载荷.....	46
第 5 节 张力腿平台水动力参数及分析方法.....	48
附录 B 张力腿平台结构强度分析参考方法.....	53
第 1 节 概述.....	53
第 2 节 张力腿平台整体结构强度分析.....	53
第 3 节 张力腿平台局部结构强度分析.....	55
第 4 节 立柱及浮箱框架强度分析.....	55
第 5 节 张力腿平台疲劳强度分析.....	56
附录 C 名词中英文对照表	58
参考文献	59

第 1 章 通 则

第 1 节 一般规定

1.1.1 本指南适用于钢质焊接的张力腿平台。

1.1.2 本指南旨在提供张力腿平台设计、建造和安装各阶段所需满足的要求，以作为 CCS 对张力腿平台入级的指导文件。同时也可以作为设计者、作业者、平台业主等各方在张力腿平台项目实施过程中的技术参考文件。

1.1.3 特殊类型和采用新颖结构型式的张力腿平台入级应另行考虑，并经 CCS 同意。

1.1.4 除本指南另有规定者外，张力腿平台入级审查和检验应依照 CCS《海上浮式装置入级规范》的相关要求执行。

1.1.5 张力腿平台的设计者和分析者应意识到张力腿平台的所属国（船旗国/沿岸国）的要求与本指南的要求不一致时，CCS 可考虑使用该替代要求作为入级要求的一部分。

1.1.6 对于每一个张力腿平台项目，其入级范围取决于业主所申请的入级符号和附加标志，但最少应包括下浮体和张力腿系统。

1.1.7 当主管当局允许张力腿平台以第三方发证检验的方式进行时，本指南可作为第三方发证检验的技术参考文件。

1.1.8 CCS 同样接受经过工程实践或者试验验证过的、合适的方法来代替本指南中的方法，但该方法应能与本指南方法达到同等的安全水平，如美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》可视为与本指南具有同等安全水平。

第 2 节 入级符号

1.2.1 入级符号应按照 CCS《海上浮式装置入级规范》第 1 篇第 2 章和第 9 篇第 1 章的相关要求执行。

第 3 节 定义

1.3.1 张力腿平台：为海上浮式装置的一种，通过张力腿系统固定于海底。张力腿系统确保平台保持张力状态，并将平台由于风、浪、流、潮汐、环流（如适用）和内波（如适用）等导致的运动限制在指定范围以内。张力筋腱承受预张力，使得其轴向刚度很大，可将垂荡、纵摇和横摇响应限制在较小的幅度范围之内，见图 1.3.1。常见的张力腿平台型式见 1.3.2 至 1.3.5 所定义。

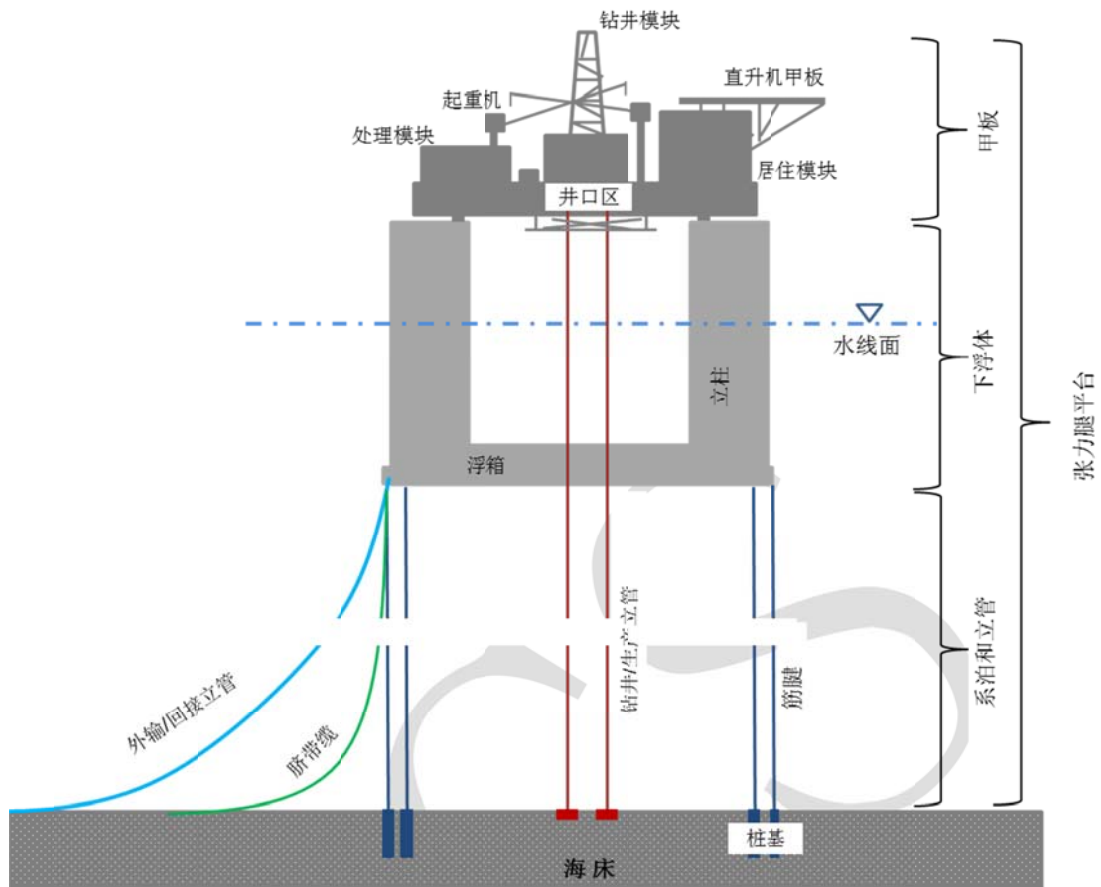


图 1.3.1 张力腿平台名词术语

1.3.2 传统式张力腿平台：系指其设计遵循四立柱柱稳式平台原则的平台，其张力筋腱的上端连接在与立柱连为一体的筋腱与浮体连接结构上，或者连接在四个立柱内部结构上，见图 1.3.2。

1.3.3 延伸式张力腿平台：系指立柱更靠近平台中心，但是浮箱具有径向往外延伸的结构，其筋腱与浮体连接结构设置在延伸浮箱远离平台中心的末端，从而可以产生更大的力矩，同时也减少了甲板的跨距，见图 1.3.3。

1.3.4 海星式张力腿平台：系指通常具有一个位于平台中心的立柱和至少三个径向往外延伸浮箱的平台，其筋腱与浮体连接结构设置在延伸浮箱远离平台中心的末端，见图 1.3.4。

1.3.5 摩西式张力腿平台：摩西式张力腿平台由四根紧密靠近的立柱支撑上部组块并连接下部浮箱。其筋腱与浮体连接结构设置在浮箱的四个向外延伸结构上，该连接形式可增加筋腱张力的力臂，减小由平台横摇和纵摇产生的筋腱张力，见图 1.3.5。

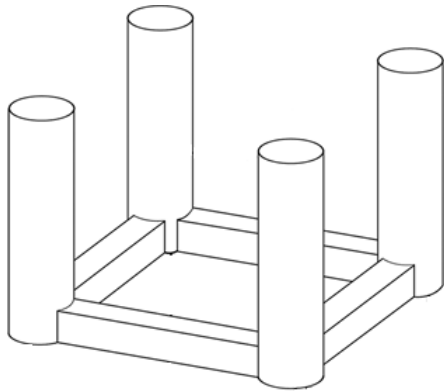


图 1.3.2 传统式张力腿平台

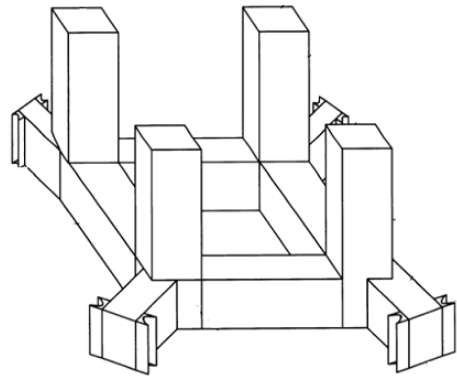


图 1.3.3 延伸式张力腿平台

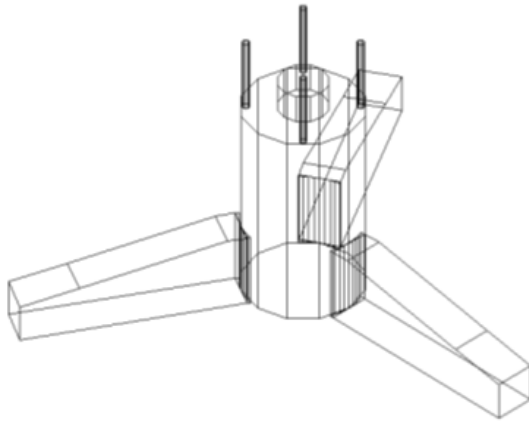


图 1.3.4 海星式张力腿平台

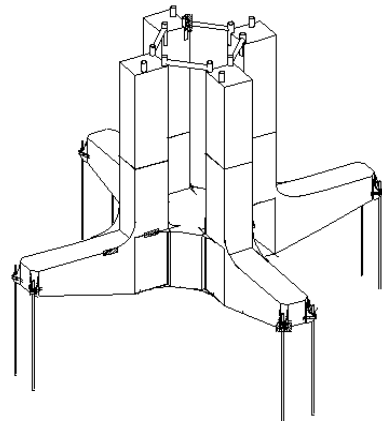


图 1.3.5 摩西式张力腿平台

1.3.6 下浮体：系指由立柱和浮箱组成的水密结构和系统，主要用于提供平台浮力，支撑上部组块，并与张力腿系统连接。

1.3.7 张力腿系统：系指平台至海底基础之间的垂向系泊系统，主要由顶部连接部件、主体部分和底部连接部件组成。其中，主体部分由筋腱单元通过连接器连接而成，连接器可以是机械连接、焊接或者其他满足要求的连接形式。除承载结构外，张力腿系统也可有其他部件，如腐蚀保护系统、筋腱载荷和性能监测系统、涡激振动抑制装置等。

1.3.8 顶部张紧立管：系指顶部在拉力作用下始终处于张紧状态的连接水面浮体与水下井口的管道，可作为钻完井/修井作业的通道、或作为生产/注入/输出流体的通道。

1.3.9 基础：系指位于海床上将张力筋腱上的载荷传递到海床土壤中的基础结构。

1.3.10 整体式甲板：系指参与平台整体强度的组块甲板。

1.3.11 非整体式甲板：系指平台主体带有顶部框架，从而不参与平台整体强度的组块甲板。

第 4 节 图纸和资料

1.4.1 新建张力腿平台申请入级时，申请人应在施工前提交下列图纸资料一式四份纸质文件送 CCS 审查，或通过电子图纸送审，必要时 CCS 可要求扩大送审图纸资料的范围。

1.4.2 总体布置和结构相关图纸应清晰地表明构件尺寸、结构布置、材料类型和等级、节点详图、焊接或其他连接方式，图纸和资料包括但不限于：

- (1) 总布置图；
- (2) 固定和可变重量分布概要；
- (3) 甲板载荷说明书和图；
- (4) 基本结构图：包括浮箱和立柱的纵横剖面、各层甲板和平台、整体或非整体式甲板、筋腱系统；
- (5) 油密和水密舱壁图；
- (6) 外板展开图（适用时）；
- (7) 平台立柱、浮箱、撑杆结构图（适用时）；
- (8) 平台上部甲板结构图；
- (9) 平台筋腱系统图；
- (10) 平台立管系统图；
- (11) 平台底部基础结构图；
- (12) 平台干拖系固结构图（适用时）；
- (13) 平台总体性能计算书；
- (14) 平台气隙计算书；
- (15) 风、浪、流及其他环境载荷计算书，包括结冰影响（适用时）；
- (16) 平台结构总强度计算书（考虑建造、拖航、安装以及在位等多种可能工况）；
- (17) 平台结构疲劳强度计算书；
- (18) 筋腱强度计算书（包括自由站立、在位等工况）；
- (19) 顶张紧立管图纸及计算书；
- (20) 平台主体开口与补强结构图，及其强度计算书；
- (21) 重要基座结构及其支撑结构图，包括强度计算书；
- (22) 桅、起重机基座及其支撑结构图；
- (23) 冰区加强结构图（适用时）；
- (24) 防腐控制，包括涂装和阴极保护；
- (25) 建造程序和原则工艺说明书，包括焊接方式和规格、无损探伤及密性试验；
- (26) 临时锚泊和拖曳设备布置图，包括舾装数计算及拖曳设备强度计算书；
- (27) 井架、张紧器和上部设施传递的作业载荷及其他类似载荷计算书（适用时）；
- (28) 装载手册；
- (29) 疲劳关键节点图或说明书；
- (30) 操作手册；
- (31) 建造说明书；
- (32) 海上安装过程图纸和计算书；
- (33) 在位检修计划；
- (34) 下列图纸资料备查：
 - ① 设计任务书（必要时）；
 - ② 结构及设备说明书；

-
- ③ 舱容图;
 - ④ 液舱测深表;
 - ⑤ 平台风洞试验报告;
 - ⑥ 平台水池试验报告;
 - ⑦ 平台水池拖曳试验报告 (适用时);
 - ⑧ 型线图 (适用时)。

1.4.3 平台其他图纸和资料要求见本指南后续各章以及 CCS《海上浮式装置入级规范》的相关要求。

第 5 节 设计原则

1.5.1 平台设计的主要目标如下:

(1) 满足业主/作业者的要求, 在安全经济的条件下, 能高效地完成钻井、生产、储存、材料装卸、提供生活住所等一种功能或多种功能的组合。

(2) 满足所有条件的设计, 考虑在建造、装船、运输、安装、调试和在位操作/维修工况下可能会遇到的所有条件。

1.5.2 平台的总体设计原则可参照 CCS《海上浮式装置入级规范》第 2 篇第 2 章的有关要求。

1.5.3 环境条件重现期的选择应考虑相应的工况类别。不同的工况可能导致不同位置的结构产生最恶劣的响应。

1.5.4 对张力腿平台而言, 某些关键区域结构应力最大的响应不一定是在最恶劣环境条件下产生。必要时, 可采用下列方法或其中之一来评估此区域的结构强度:

- (1) 进行详细的疲劳强度分析;
- (2) 进行基于应力幅频响应算子 (Stress RAOs) 的设计波选择及相应的强度校核。

1.5.5 定义设计工况要求考虑的因素包括项目阶段 (如建造、安装、在位等)、平台载荷工况、设计环境条件及对应的安全系数。所有载荷应按平台在不同项目阶段可能出现的最不利的情况进行组合。

1.5.6 业主/设计方应提交平台所遵循的相关法规、规范、标准要求, 包括但不限于:

- (1) 国际公约和规则;
- (2) 船旗国要求;
- (3) 沿岸国要求;
- (4) 行业标准;
- (5) 入级符号。

1.5.7 在船旗国或沿岸国的法定要求与入级规范要求不一致时, 以法定要求和入级规范要求中更严格者为准。

1.5.8 必要时, CCS 保留参考国际海事组织《海上移动式钻井平台构造和设备规则》要求的权利。

第 6 节 水下检验标志

1.6.1 水下检验标志应满足 CCS《海上浮式装置入级规范》第 9 篇第 5 章的有关要求。



第 2 章 稳性和重量控制

第 1 节 一般规定

2.1.1 张力腿平台的稳性要求包括：湿拖过程稳性、安装过程稳性及在位状态稳性，详见本章第 2 节要求。

2.1.2 相关图纸资料包括：

- (1) 湿拖完整和破损稳性计算书；
- (2) 安装过程稳性计算书；
- (3) 载重线标志及水尺图；
- (4) 外部水密及风雨密完整性范围图；
- (5) 水密和风雨密门、窗及其它内外部开口类型及布置图；
- (6) 备查图纸资料包括但不限于：
 - ① 型线图（适用时）；
 - ② 静水力表；
 - ③ 稳性横交曲线图（适用时）；
 - ④ 舱容图；
 - ⑤ 水密舱区划分图；
 - ⑥ 重量控制报告。

第 2 节 稳性

2.2.1 湿拖过程中完整和破损稳性

- (1) 平台在湿拖过程中的完整和破损稳性应满足沿岸国及船旗国相关要求。
- (2) 如在湿拖过程中平台上留有人员，则所有设计湿拖装载模式对应的完整和破损稳性应满足 CCS《海上移动平台入级规范》第 3 篇对柱稳式平台的相关要求。在进行稳性计算校核时也可根据拖航航线的具体环境条件确定计算风速大小，但需经 CCS 认可。

2.2.2 安装过程稳性

当平台处于打/排压载的安装过程，即张力筋腱进入筋腱抱紧器（Tendon Porch）但未锁紧时，经自由液面修正后平台的最小初稳性高度应保持正值。

2.2.3 在位状态稳性

- (1) 当平台处于在位状态时，为保证平台和张力筋腱的完整性及应对张力筋腱可能的松弛趋势，应确保平台在正常作业工况时张力筋腱始终处于张紧状态。
- (2) 平台完整状态应涵盖所有允许出现的重心变化范围，但不可超出平台操作程序允许的重心范围。

2.2.4 平台作业时的破损状态应虑及设计水线受潮位和因偏移引起的垂直下沉的影响，并确保在经受以下进水情况时筋腱张力为正：

- (1) 任何单个处于设计水线或位于其下的水密舱室；
- (2) 假设在设计水线以上 5m 至设计水线以下 3m 的区域内，发生宽 3m 高 3m 自外板水平贯入 1.5m 范围的破损。其中垂向舱壁应假定不发生破损，但当沿立柱外缘量得某垂向舱壁与距其最近的垂向舱壁之间距离小于水线处立柱外缘周长的 1/8 或 3m 的情况除外；

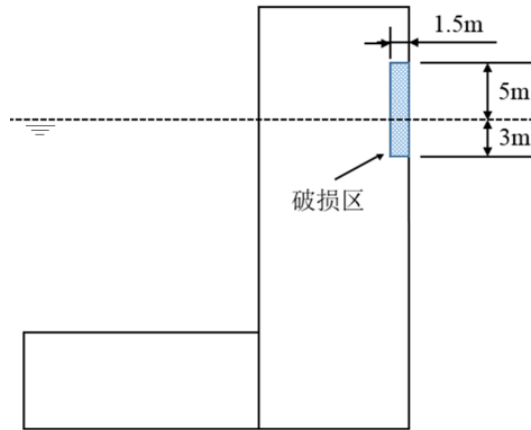


图 2.2.4 张力腿平台舱室破损范围示意图

- (3) 任何单个张力筋腱舱室。
- 应通过计算分析证明当发生以上假定破损进水时张力筋腱仍处于张紧状态，计算中不考虑通过液舱的压载或排载等改变装载状态的方式以达到使张力筋腱仍处于张紧状态的目的，且计算分析应充分合理地考虑设计作业环境条件的影响。

第 3 节 重量控制

2.3.1 一般规定

(1) 重量控制程序包括：

- ① 设计阶段对各组件和模块重量的预估；
- ② 建造阶段对各组成部件重量的测量或可接受的等效计算方法；
- ③ 组装及调试过程中的重量追踪；
- ④ 倾斜试验。

(2) 平台在位后的任何永久设施的重量变化（增加、减小和移动）都应记录在册。当空船重量的改变超过操作手册中的重量重心允许变化值时，应提交 CCS 审查和批准。

2.3.2 倾斜试验

- (1) 新建平台或经历重大改造的平台应进行倾斜试验以确定平台空船重量及重心位置。
- (2) 倾斜试验应尽可能在接近完工时进行，且应有 CCS 验船师在场并使其满意。试验程序应在试验进行之前提交 CCS 检查。
- (3) 倾斜试验所得结果应提交 CCS 审查。

2.3.3 倾斜试验替代方法

- (1) 若平台因特殊的布局形式和/或安装过程所限无法适时进行倾斜试验，可以考虑用替代方法确定平台的重量和重心位置。当垂向重心不便于测量时，应采用保守方法估算。
- (2) 替代方法可以使用经认证的称重传感器测量平台及其组件的重量，最终的重量重

心结果和整个过程应经 CCS 同意。

第 4 节 水密和风雨密完整性

2.4.1 一般要求

应提交一张可显示全部非自动关闭装置的开/关状态，及显示所有配备风雨密、水密关闭装置的开口和无保护开口位置的图纸，该图纸应在平台交付前提交 CCS 审查，审查通过后纳入平台操作手册中。

2.4.2 水密完整性

(1) 为确保平台的水密完整性，所有下缘低于水密范围和风雨密范围边界面的内部以及外部开口均应配备水密关闭装置。

(2) 配备水密关闭装置的内部开口应满足以下要求：

- ① 平台漂浮作业时要使用的、确保水密完整性的门及舱口盖，应能从中央压载控制站进行遥控，并且也能从舱壁两侧就地进行操作。在控制站，应设置开启/关闭指示器。此外，为确保在海上使用的内部开口的水密完整性而设置的门须是滑动水密门，且该门在关闭时应能发出声响报警。在主动力失灵时，动力、控制和指示器应能工作。特别应注意减少控制系统失灵的影响。每一个动力操纵的滑动水密门应有一个独立的手动机械操纵装置，该装置应能从门的任一边用手开启和关闭该门。对于最深载重线对应吃水以上的门，如其在平台处于漂浮状态时通常关闭，则可为速闭型，并应设有一个报警装置（如灯光信号）向就地和中央压载控制站的人员显示门或舱口盖处于开启或关闭状态；
- ② 配备螺栓盖的人孔可不必按照 2.4.2 (2) ① 的要求配备信号指示系统；
- ③ 水密关闭装置应具有足够的强度和密封性使得其在设计水压作用下能保证结构的水密完整性。

(3) 外部开口应满足以下要求：

- ① 空气管、通风筒及无论是否装备了关闭设备的通风进/出口及非水密舱口盖和风雨密门，这些开口的下缘应高于平台外部水密范围和风雨密范围的交界面高度；
- ② 配备螺栓盖的人孔可不必满足上条要求；
- ③ 配备水密关闭装置的外部开口，通常应处于关闭状态，且应满足 2.4.2 (2) 的要求。

(4) 边界贯通

- ① 为满足破损稳性而必须布置的水密舱壁和水密平台应是整体水密的。当管线系统服务于多个舱室处所或位于破损范围之内时，相关管线和设备的布置设计应能阻止通过管线而引起更严重的进水；
- ② 水密边界贯通处的阀门应能从平台立柱顶部或上部组块遥控操纵；
- ③ 管系或电缆穿舱要依照设计规格书和建造程序进行，穿舱件应设计成能够承受相应的水压；
- ④ 应提交水密边界密性实船试验结果资料。

2.4.3 风雨密完整性

(1) 平台外部开口应满足载重线公约的相关要求。当外部开口下缘低于需要确保风雨

密性的区域的高度时，需要配备风雨密保护装置。

(2) 风雨密保护装置应能有效阻止开口因间歇性浸没而引起的渗水。

CCS

第3章 设计载荷和工况

第1节 一般规定

3.1.1 本节规定了用于张力腿平台结构强度计算校核的设计载荷和工况。

3.1.2 张力腿平台的设计应至少考虑以下两种状态下最不利的载荷及其组合：

(1) 在位前工况：如干拖对应的装船、运输、下水和安装工况，或湿拖对应的拖航和安装工况。

(2) 在位工况：包括作业工况、极端工况和自存工况。

3.1.3 在操作手册中应注明每种工况的设计限制条件。

3.1.4 业主/设计者应对规定作为入级基础的各设计工况和相应的环境条件，给予明确规定。

第2节 设计载荷

3.2.1 一般要求

应根据平台实际载荷情况，考虑平台在装船、运输、安装、作业、极端、自存等设计工况下的运动响应和载荷。

3.2.2 环境载荷

(1) 环境载荷系指直接或间接由环境作用引起的载荷，环境载荷一般由下列载荷组成：

- ① 风载荷；
- ② 波浪载荷；
- ③ 海流载荷。

如果业主/设计者认为需要，则地震、海床承载能力、温度、污底、冰/雪、内波、环流等引起的载荷也应考虑。

(2) 如可能，设计环境条件应根据可靠及足够的实测资料由统计分析确定。

(3) 对于浮箱、立柱、立柱上部桁架以及上甲板底部构件等可能遭受波浪砰击的结构，还应考虑在运输过程中和在位后营运过程中所受的波浪砰击载荷。

(4) 环境载荷除按本章给出的方法确定外，还可采用其他公认的方法进行计算，必要时应通过数值计算和模型试验进行确定。

3.2.3 固定载荷

固定载荷系指在结构寿命期间内平台结构固定重量和不变化的永久设备重量。

固定载荷一般由下列载荷组成：

- ① 空船重量；
- ② 甲板固定载荷；
- ③ 永久设备重量；

- ④ 固定附件重量。

3.2.4 可变载荷

可变载荷系指在结构寿命期间内可变的静荷载。可变荷载大小能被改变，被移动或被移除，因此必须考虑可变荷载的最大和最小有效载荷。

可变载荷一般由下列载荷组成：

- ① 钻井和起重作业等载荷，比如：大钩载荷，转盘、钻井立管和张紧器载荷等，如适用时，还应考虑生产和处理、储罐等设备的重量；
- ② 油、水、泥浆、存储品等消耗品；
- ③ 压载载荷；
- ④ 系泊载荷（适用时）；
- ⑤ 张力筋腱的张力载荷；
- ⑥ 生产立管和脐带缆等张力载荷（适用时）；
- ⑦ 海生物、露天结构上积聚的冰/雪载荷（适用时）。

3.2.5 安装载荷

应考虑张力腿平台在在位前可能产生的各种载荷，包括装船、运输、下水和安装等，例如运输过程中的风激振动、波浪砰击和下水过程中的压载/排载和静水压及张力筋腱安装过程中的压载/排载和静水压。

3.2.6 地震载荷

(1) 地震载荷是与垂直、水平加速度以及运动相关的载荷，用于评估地震条件下的筋腱系统和基础。

(2) 对于在有可能发生地震地点作业的平台，入级时需要提交对筋腱系统及其基础的评估文件。

3.2.7 意外载荷

(1) 意外载荷通常产生于非正常操作或技术故障，如：

- ① 坠物；
- ② 船舶、直升机或其它物体的撞击；
- ③ 火灾；
- ④ 爆炸；
- ⑤ 舱室意外进水；
- ⑥ 筋腱系统失效。

(2) 意外载荷如碰撞载荷、坠物载荷的计算方法参见《海上浮式装置入级规范》第2篇第6章第5节的相关要求。

第3节 设计工况

3.3.1 一般要求

(1) 设计装载工况用于进行结构强度分析，包含张力腿平台生命周期的所有阶段，并考虑相应的不同的环境载荷。

(2) 张力腿平台的强度分析应至少考虑以下设计工况：在位前工况、正常作业工况、极端工况、自存工况。

3.3.2 在位前工况

-
- (1) 在位前工况包括：
- ① 装船；
 - ② 湿拖，适用时；
 - ③ 干拖，适用时；
 - ④ 甲板和上部模块安装；
 - ⑤ 张力筋腱预安装；
 - ⑥ 张力筋腱在安装前的自由站立工况，适用时；
 - ⑦ 张力筋腱和立管与张力腿平台的连接。
- (2) 拖航工况的要求还应满足相关主管机关的要求。

3.3.3 正常作业工况

(1) 应对张力腿平台及其系统在作业地点处处于正常作业情况下的结构进行检查。钻井等作业所需限定的作业参数（最大波高和周期、最大横摇和纵摇、最大偏移量等）应提交 CCS 审查并获同意。

(2) 正常作业工况还应考虑容许的变形和振动。

3.3.4 极端工况

(1) 在极端工况下，应确定张力腿平台及其系统的结构强度可靠性。设计的平台结构应能在该工况下正常使用，且在后期的使用中不太可能遭受破坏。该工况类别涵盖的平台状态包括完好、破损或张力腿移除情况。

(2) 极端工况相应于：

- ① 极端设计环境，见 3.4.3；
- ② 折减设计环境与下浮体损坏、一根筋腱移除或某根筋腱的单个舱室进水的情况，见 3.4.5。

3.3.5 自存工况

(1) 自存工况用于确定结构为应对过载状况（预计在结构寿命期间很少出现）的储备强度。该工况下，张力腿平台应能够承受过载状况，且不会出现人员死亡、环境破坏或平台全损的情况。

(2) 自存工况相应于：

- ① 自存设计环境，见 3.4.4；
- ② 极端或折减设计环境与下浮体损坏、一根筋腱移除或某根筋腱的单个舱室进水的情况。

第 4 节 环境条件

3.4.1 一般要求

(1) 张力腿平台的设计应能承受设计环境条件下特定的极端风暴，并能在设计操作工况下进行操作。

(2) 设计环境条件一般与风、浪、流载荷相关。此外，还需考虑海平面上潮汐、风暴潮、平均海平面升高和海底沉降等的影响，以及 3.2.2 中提到的其它环境条件，如内波和环流等。

(3) 设计环境条件应根据张力腿平台的响应特征进行选择。

(4) 环境条件应由设计方或者业主指定。

3.4.2 作业环境条件

作业环境条件是指在位期间经常发生的环境条件。正常作业工况的环境载荷重现期应不小于1年。

3.4.3 极端环境条件

极端环境条件是指结构使用期间内发生的低概率的环境条件。极端工况的环境载荷重现期应不小于100年。

3.4.4 自存环境条件

自存环境条件是指结构使用期间内以非常低概率发生的环境条件。自存工况的环境载荷重现期应不小于1000年。

3.4.5 折减环境条件

(1) 折减环境条件对应的是张力腿平台在局部破损或者张力筋腱移除/进水后的可能遭遇的环境条件，该状态发生概率较小。

(2) 折减极端环境工况对应的环境重现期可以根据概率分析得到。在无详细分析的情况下，折减极端环境工况的环境载荷重现期应不小于10年。

3.4.6 平静环境条件

某些作业必须在平静环境条件下才可进行，这种工况下的风、浪、流很小，环境载荷可以忽略不计。

第 5 节 平台状态设计工况

3.5.1 一般要求

设计装载工况需要考虑张力腿平台及其系统的工况：完整、破损、张力筋腱移除、张力筋腱进水。

3.5.2 平台下浮体完整工况

平台及其组成部分按照设计情况作业。

3.5.3 平台下浮体破损工况

破损的范围应依照本指南第 2 章 2.2.4 破损稳性计算中的要求确定，破损工况包含以下进水情况：

- ① 任一与海水相邻的舱室；
- ② 水线处任意相邻的两个舱室；
- ③ 任一位于破损范围内的水平底；
- ④ 任一包含压载水泵或海水冷却系统的机器处所。

3.5.4 张力筋腱移除工况

- (1) 张力筋腱移除工况是指一根筋腱移除用于检查、维修或更换。
- (2) 张力筋腱移除工况是有计划的，应该考虑压载水补偿。

3.5.5 张力筋腱进水工况

- (1) 张力筋腱进水工况适用于管状筋腱，并认为是筋腱内部一个舱室进水。
- (2) 张力筋腱进水工况不是有计划的，应考虑有压载水补偿和无压载水补偿两种情况。

3.5.6 张力筋腱疲劳工况

张力筋腱疲劳工况只考虑完整工况，包括筋腱安装时的自由悬挂、安装完毕后的自由站立以及在位疲劳。

第 6 节 总体性能和载荷预报

3.6.1 一般要求

- (1) 总体性能和载荷可通过数值计算和模型试验进行预报。
- (2) 总体性能应由时域分析方法得到，频域分析方法可作为前期的方案比选使用。
- (3) 总体性能预报的目标是确定张力腿平台及其附属结构（如立管、张力筋腱等）在环境载荷作用下的整体响应。
- (4) 总体性能预报应考虑本章第 4 节所述各个环境条件，并对以下内容进行预报：
 - ① 平台六个自由度的运动；
 - ② 张力筋腱的张力，包括最大和最小张力以及用于张力筋腱设计的疲劳载荷；
 - ③ 整体结构分析的等效设计波高和相应周期；
 - ④ 用于整体结构分析的水动压力；
 - ⑤ 用于确定惯性载荷的平台各个位置的加速度；
 - ⑥ 用于局部结构（舾装部件等）设计的波浪水质点和结构的相对速度。
- (5) 模型中应包含平台主体、甲板、张力筋腱及立管，并对各个载荷工况进行分析，以便得到平台各个不同结构部位的响应极值。为此，可采用多个不同的模型进行分析，对不同的分析模型及方法可参考美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》中的相关内容。

3.6.2 频域分析

- (1) 频域分析包括张力腿平台六个自由度的波频分析，以及纵荡、横荡和首摇的低频分析。
- (2) 为了获得平台和张力筋腱的一阶响应，通常在频域分析中采用线性波浪理论。
- (3) 在频域中，风、浪、流等载荷通常以风和流的入射以及波浪的辐射衍射理论进行求解，在分析中需用到浮体的平均湿表面。分析的结果包括一阶激振力、静水力、势流阻尼、附加质量、一阶响应幅算子（RAOs）、二阶慢漂力和风、流载荷谱。这些结果可直接用在频域的耦合分析中。在时域耦合分析中，可将频域分析得到的水动力系数进行卷积积分，转换成时域分析可用的数据。
- (4) 非线性二阶慢漂力会引起浮体低频运动。平台的横荡和纵荡周期一般较长，二阶慢漂力可由纽曼近似法得到。
- (5) 随机海况下的二阶波浪力的和频分量会引起张力腿平台在垂荡、横摇和纵摇的共振，即为弹振。此外，深水张力腿平台也可能会在高频段产生较大的鸣振。此时，通常需

要采用时域法结合模型试验估算张力腿平台的高频响应。

(6) 应根据已有的工程经验或模型试验确定分析中的阻尼并在报告中明确给出。

3.6.3 时域分析

(1) 时域分析是评估张力腿平台响应的非线性效应的理想方法，计及的非线性效应包括平台主体拖曳力、有限波幅效应、筋腱和立管的非线性回复力、弹振和鸣振、以及平台主体、筋腱和立管三者间的耦合效应。

(2) 时域分析是在时域里求解描述平台平均、低频和波频组合响应的一般运动方程。外力函数包括由风、浪、流产生的平均力、低频力和波频力。平台、张力筋腱和立管载荷都可以在同一个时域动力学方程组中模拟，从而获得所有系统参数（平台位移、筋腱张力等）的时间历程，然后对时间历程进行统计，进而得到期望的极值。时域模拟的时间应该足够长以得到稳定的统计峰值，并应尽可能使得时域模拟中不规则波的随机种子数能够准确模拟实际海况。

3.6.4 气隙

(1) 气隙系指平台在就位后，平台上部甲板最低主构件下缘与最大设计波高的波峰之间的净空距离，气隙建议按以下原则确定：

- ① 在本章第 4 节中的极端环境工况下，气隙不小于 1.5 米；
- ② 在本章第 4 节中的自存环境工况下，气隙不为负值。若自存工况下的气隙无法满足不为负值的要求，或者设计者选择气隙为负值的设计，张力腿平台的各系统如甲板、下浮体、筋腱和基础的设计均应考虑波浪的冲击对平台总体和局部的影响。

(2) 气隙通常应通过数值计算与模型试验确定。

第 4 章 下浮体和主要结构

第 1 节 一般规定

4.1.1 适用范围

- (1) 本章为张力腿平台结构设计的通用要求。
- (2) 本章中未明确规定者,应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇有关柱稳式平台的相关要求。
- (3) 下浮体和主要结构应满足国际海事组织《海上移动式钻井平台构造和设备规则》第 2 章有关柱稳式平台的要求。

4.1.2 结构设计的原则

平台的结构设计应能承受在位前工况(装船、拖航和安装)和在位工况(在位)期间的所有可能载荷的联合作用,具体校核工况见本章第 7 节相关要求。

4.1.3 结构分类

(1) 根据构件所承受的载荷、应力水平及模式、关键载荷传递和应力集中以及失效后果,所有平台结构构件可分为:

- ① 特殊构件:在关键载荷传递点和应力集中处的主要构件;
- ② 主要构件:对平台结构整体完整性有重要作用的构件;
- ③ 次要构件:其失效不会影响平台结构整体完整性的非重要构件。

(2) 根据 4.1.3 (1) 的定义,张力腿平台的特殊构件、主要构件及次要构件分类如下:

- ① 特殊构件:
 - 张力筋腱和筋腱抱紧器;
 - 立柱与上部模块甲板、浮箱交接部分,立管抱紧器与平台交接部分,外壳板及其内部承受/传递集中载荷的外部肘板/舱壁/框架等其他构件(范围为连接部分在所有方向至少 1m);
 - 上部组块承受主要集中载荷的甲板和主要桁架相交位置;
 - 部分起重机底座和火炬臂支撑结构,如底座或支撑结构与下浮体的连接构件。
- ② 主要构件:
 - 立柱、浮箱的外壳板、立柱顶部框架(作为特殊构件者除外);
 - 在结构相交部分的提供加强或延续结构连续性的构件(作为特殊构件者除外);
 - 整体式甲板主要桁材和甲板板(作为特殊构件者除外);
 - 甲板的立柱及斜撑;
 - 用以保证平台整体强度的舱壁、桁材;
 - 井架支撑结构、重型设备的支撑结构或底凳;
 - 起重机底座和火炬臂支撑结构(作为特殊构件者除外);
 - 直升机甲板和救生艇平台的主要支撑结构。
- ③ 次要结构:
 - 立柱的舱壁和桁材,上部组块、浮箱和立柱顶部框架的内部结构(作为特殊构件、主要构件者除外);

- 易于检查的承受较低应力水平的加强筋、桁材或舱壁结构；
 - 其他除特殊构件和主要构件之外的结构。
- (3)送审图纸中应标明结构分类。必要时,CCS 将根据实际情况对构件分类进行调整。

第 2 节 结构用钢和焊缝设计

4.2.1 一般规定

(1) 张力腿平台的结构用钢应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的相关规定。

(2) 张力腿平台的结构焊缝设计应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 1 章第 5 节的相关规定。

第 3 节 结构防腐

4.3.1 一般规定

(1) 结构用钢应使用相应的防腐蚀系统进行防腐。防腐应按照公认的行业标准设计阴极保护和防腐涂层的腐蚀防护系统,并应兼顾平台拟运营海域的特殊要求,如中国南海的高温、高盐、以及高紫外线对结构防腐的不利影响。

(2) 防腐控制系统的设计寿命应不小于张力腿平台的设计使用年限。

(3) 在飞溅区内的外板应考虑增加额外的腐蚀余量,例如有些张力腿平台在立柱飞溅区采用 9mm 腐蚀裕量、在撑管飞溅区采用 13mm 腐蚀裕量,并与涂层防腐系统综合使用,达到了较好的防腐效果。

第 4 节 结构布置

4.4.1 上部组块的甲板对接短柱布置

(1) 立柱与上部组块之间的甲板对接短柱结构设计应满足平台整体强度的要求。如甲板对接短柱会发生明显的变形,则在结构分析中应予以重点关注。

(2) 上部组块的模块结构防火设计,包括烃处理区域的布置,应符合 CCS《海上油气处理系统规范》的相关规定。

4.4.2 直升机甲板

直升机甲板的结构及布置应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 8 篇第 10 章的相关规定。

4.4.3 立柱

立柱的设计应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 5 章第 5 节的相关规定。

4.4.4 栏杆和扶手

栏杆和扶手的设计应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 1 章 1.8.5 的相关规定。

4.4.5 主要设备基座

(1) 重型底座和设备支撑结构, 如钻台基座、起重机底座及其支撑结构、隔水管支撑结构, 应设计具有足够的强度和疲劳寿命。

(2) 设计时除了考虑局部载荷还应考虑整体载荷产生的变形、惯性力等因素, 其强度应满足 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 3 章的相关要求。

4.4.6 结构附属构件

下浮体外部的附属构件结构设计时, 应考虑波浪引起的局部拖曳力、惯性力以及由于平台运动产生的载荷。其支撑结构应采用与主体结构同等的载荷和安全系数设计。

4.4.7 临时结构

在位前下浮体和上部组块的临时支撑结构不作为入级检验的内容。但临时结构及其支撑的下浮体和上部组块应具有足够的局部和整体强度, 应满足 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 3 章的相关要求。

4.4.8 通道

通道应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 1 章第 8 节 1.8.2 的相关规定。

4.4.9 燃油舱保护

燃油舱保护应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 1 章第 8 节 1.8.3 的相关规定。

第 5 节 关键连接结构设计和分析

4.5.1 一般规定

(1) 应依据公认或经 CCS 认可的标准进行关键连接结构的设计。

(2) 疲劳强度应满足 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》的相关要求。

4.5.2 平台与立管系统的连接

(1) 立管抱紧器、导向和支撑, 包括平台上的支撑结构(平台加强结构), 应按照最大预期立管载荷设计。安全系数在设计极端工况下取 1.25, 在设计作业工况下取 1.67。

(2) 疲劳强度分析还应考虑立管的局部拖曳力、惯性力以及平台的整体运动载荷。

4.5.3 平台与筋腱连接

(1) 筋腱抱紧器和平台下浮体支撑结构, 按照最大预期筋腱载荷设计, 安全系数在设计极端工况下取 1.25, 在设计作业工况下取 1.67。

(2) 疲劳强度分析时还应考虑筋腱的局部拖曳力和惯性力, 以及平台的整体运动载荷。

4.5.4 上部组块甲板与模块连接

(1) 设备/机械底座或模块下的甲板及其支撑结构应设计成能承受最大可能的预期载荷以及平台运动产生的惯性力作用。安全系数在设计极端工况下取 1.25, 在设计作业工况下取 1.67。

(2) 应进行疲劳强度分析(如适用)。

第 6 节 下浮体部分的构件尺寸

4.6.1 一般要求

(1) 下浮体的结构构件初始尺寸设计应满足 CCS《海上移动平台入级规范》和 CCS《钢质海船入级规范》的适用要求。以上规范中未作出要求的部分可以基于公认的规范和标准进行设计。

(2) 按本节规定计算的构件尺寸为规范要求的最小结构尺寸，其强度还应满足平台总体强度要求。

4.6.2 立柱和浮箱外边界

(1) 立柱和浮箱外边界构件尺寸应按照本条规定确定。此外，构件尺寸还应满足本节 4.6.3 对水密舱壁的要求，并取计算压头至最终破损水线；液舱组成部分的构件还应满足本节 4.6.4 对液舱舱壁的要求。

(2) 立柱和浮箱外板

板厚 t 应不小于按下式计算所得之值，且不小于 9.0 mm:

$$t = 4sf\sqrt{Kh} + 2.5 \quad \text{mm}$$

式中： s ——扶强材间距，m；

f ——板格长宽比系数， $f = \frac{1}{\alpha}(1.21\sqrt{\alpha^2 + 0.33} - 0.69)$ ，且不大于 1.0；

α ——板格长宽比，长边比短边；

K ——材料系数， $K = \frac{235}{\sigma_s}$ ， σ_s 为材料的屈服强度，N/mm²；

h ——由板下缘量至破损水线的垂直距离，m，且不小于 6.0 m。

(3) 立柱和浮箱扶强材

扶强材的剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值：

$$W = 8.2sKhl^2 \quad \text{cm}^3$$

式中： s ——扶强材间距，m；

K ——材料系数， $K = \frac{235}{\sigma_s}$ ， σ_s 为材料的屈服强度，N/mm²；

h ——由板下缘量至破损水线的垂直距离，m，且不小于 6.0 m。

l ——扶强材跨距，m。

扶强材的惯性矩 I 应不小于按下式计算所得之值：

$$I = \frac{2.3Wl}{K} \quad \text{cm}^4$$

式中： W ——扶强材的剖面模数；

l ——扶强材跨距，m；

K ——材料系数， $K = \frac{235}{\sigma_s}$ ， σ_s 为材料的屈服强度，N/mm²。

(4) 立柱和浮箱桁材

桁材的剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值：

$$W = 8.2bKhl^2 \quad \text{cm}^3$$

式中： b ——桁材支撑面积宽度，m；

K ——材料系数， $K = \frac{235}{\sigma_s}$ ， σ_s 为材料的屈服强度，N/mm²；

h ——由板下缘量至破损水线的垂直距离, m , 且不小于 $6.0 m$ 。

l ——桁材跨距, m ;

桁材的惯性矩 I 应不小于按下式计算所得之值:

$$I = \frac{2.5Wl}{K} \quad \text{cm}^4$$

式中: W ——桁材的剖面模数;

l ——桁材跨距, m ;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm^2 。

4.6.3 水密舱壁

(1) 张力腿平台应按本条规定设置水密舱壁。所提交的图纸应清楚地表示出舱壁的位置和范围。

(2) 水密舱壁作为液舱舱壁时, 还应满足本节 4.6.4 对液舱舱壁的相关要求。

(3) 水密舱壁的数量和布置应确保平台具有足够的强度并满足分舱和破损稳性的要求, 并符合主管机关的有关要求。

(4) 如由于设计原因导致舱壁间距过大时, 应在舱壁间加设适当的强框架以保证平台的横向强度。

(5) 平面舱壁板

平面舱壁板厚 t 应不小于按下式计算所得之值, 且不小于 $5.5mm$:

$$t = 4sf\sqrt{Kh} \quad \text{mm}$$

式中: s ——扶强材间距, m ;

f ——板格长宽比系数, $f = \frac{1}{\alpha} (1.21\sqrt{\alpha^2 + 0.33} - 0.69)$, 且不大于 1.0 ;

α ——板格长宽比, 长边比短边;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm^2 ;

h ——取以下两者中的较大值, m , 但取值不小于 $2.5 m$:

① 由板下缘量到舱壁甲板的垂直距离;

② 由板下缘量到破损水线的垂直距离。

舱壁最下列板厚应较计算所得值增厚 $1 mm$, 污水沟及污水阱处应增厚 $2.5 mm$ 。

舱壁最下列板由内底板算起 (单底时自底部算起) 的高度应不小于 $900 mm$ 。如舱壁一侧设有双层底而另一侧为单底时, 最下列板至少高出双层底平面 $300 mm$ 。

如舱壁板厚度同与其连接的桁材腹板厚度相差过大时, 该连接区域的舱壁板应适当予以增厚。

(6) 平面舱壁扶强材

舱壁扶强材的剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值:

$$W = CsKhl^2 \quad \text{cm}^3$$

式中: C ——系数, 按下面情况选取:

$C=6$, 扶强材一端或两端无支撑;

$C=3$, 扶强材两端均有支撑。

s ——扶强材间距, m ;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm²;

h ——取以下两者较大值, m, 但取值不小于 2.5 m:

- ① 由扶强材的跨距中点量到舱壁甲板的垂直距离;
- ② 由扶强材的跨距中点量到破损水线的垂直距离。

l ——扶强材的跨距, m。

(7) 桁材

桁材剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值:

$$W = 6.6bKh^2 \quad \text{cm}^3$$

式中: b ——桁材支持面积的宽度, m;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm²;

h ——取以下两者较大值, m, 但取值不小于 2m:

- ① 由桁材的跨距中点量到舱壁甲板的垂直距离;
- ② 由桁材的跨距中点量到破损水线的垂直距离。

l ——桁材的跨距, m。

桁材腹板高度不小于其支持的舱壁扶强材腹板高度的 2.5 倍, 腹板厚度应不小于舱壁板在桁材平面处的厚度, 面板宽度应不大于腹板高度或面板厚度的 35 倍。

应在桁材截面形状变化处或超过 3 m 的间距处设置防倾肘板。面板的无支持宽度超过 200 mm 时, 也须设置防倾肘板。

4.6.4 液舱舱壁

(1) 液舱舱壁系指用于压载舱、淡水舱、燃油舱、盐水舱和泥浆舱等的舱壁结构。

(2) 液舱舱壁应同时满足本节 4.6.3 对水密舱壁的相关要求。

(3) 对于使用中部分装载的液舱, 为使作用在其结构上的动应力降至最小, 必要时应设置制荡舱壁或者分舱。

(4) 燃油舱、滑油舱、淡水/饮用水舱相互间应设置隔离舱。

(5) 如果燃油舱必须设置在机舱处所之内或与之毗邻, 则其布置应避免底部直接暴露在外, 以防止万一在机舱发生火灾时导致油温迅速升高。

(6) 由于稳性要求而设置的、并且两边始终受到相等压力的纵向液舱舱壁, 其结构尺寸可按对一般水密舱壁的要求选取。

(7) 液舱设计中应考虑所装载液体的密度, 且该密度值应作为该液舱所能承受的液体最大密度, 并在有关图纸和装载手册中注明。

(8) 所有液舱的布置, 连同舱室的拟定用途以及空气管和溢流管的高度, 都应清晰地表示在送审图纸上。

(9) 液舱的试验应按《海上移动平台入级规范》第 1 篇的有关要求进行。

(10) 平面舱壁板

平面舱壁板厚 t 应不小于按下式计算所得之值:

$$t = 3.95sf\sqrt{\rho Kh} + t_0 \quad \text{mm}$$

式中: s ——扶强材间距, m;

f ——板格长宽比系数, $f = \frac{1}{\alpha} \left(1.21\sqrt{\alpha^2 + 0.33} - 0.69 \right)$, 且不大于 1.0;

α ——板材长宽比, 长边比短边;

ρ ——液体密度, t/m³, 且计算时取值应不小于 1.025;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm^2 ;

h ——由板下缘量至舱顶到溢流管顶垂直距离的 $2/3$ 处, 或量至液舱顶以上 0.9m 处的垂直距离, 取较大者, m 。

t_0 ——系数, 对装载液体密度大于等于 1.6 t/m^3 的液舱板厚取值为 3.5 , 对装载液体密度小于 1.6 t/m^3 的液舱板厚取值为 2.5 ;

舱壁的最下列板及底板的板厚应较计算所得板厚增厚 1 mm 。

污水沟或污水阱围板及底板应增厚 2.5 mm 。

(11) 平面舱壁扶强材

舱壁扶强材的剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值:

$$W = 8s\rho Khl^2 \quad \text{cm}^3$$

式中: s ——扶强材间距, m ;

ρ ——液体密度, t/m^3 , 且计算时取值应不小于 1.025 ;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm^2 ;

h ——由扶强材的跨距中点量至舱顶到溢流管顶垂直距离的 $2/3$ 处, 或量至液舱顶以上 0.9m 处的垂直距离, 取大者, m ;

l ——扶强材的跨距, m 。

扶强材的剖面惯性矩 I 应不小于按下式计算所得值:

$$I = \frac{2.3Wl}{K} \quad \text{cm}^4$$

式中: W 、 l 、 K 同上。

(12) 桁材

桁材剖面模数 W 应不小于按下式计算所得之值:

$$W = 8b\rho Khl^2 \quad \text{cm}^3$$

式中: b ——桁材支持面积的宽度, m ;

ρ ——液体密度, t/m^3 , 且计算时取值应不小于 1.025 ;

K ——材料系数, $K = \frac{235}{\sigma_s}$, σ_s 为材料的屈服强度, N/mm^2 ;

h ——桁材的跨距中点量至溢流管顶垂直距离的 $2/3$ 处, 或量至液舱顶以上 0.9 m 处的垂直距离, 取大者, m ;

l ——桁材跨距, m 。

桁材的剖面惯性矩 I 应不小于按下式计算所得之值:

$$I = \frac{2.5Wl}{K} \quad \text{cm}^4$$

式中: W 、 l 、 K 同上。

桁材腹板高度应不小于被支持的舱壁扶强材腹板高度的 2.5 倍, 腹板厚应不小于在桁材平面处舱壁板厚, 面板的宽度应不大于腹板高度或面板厚度的 35 倍。

桁材的末端应用肘板连接, 肘板应延伸至邻近的肋骨或舱壁扶强材。

第 7 节 张力腿平台结构强度

4.7.1 一般要求

(1) 张力腿平台结构通常具有两种不同的上部甲板结构型式：

- ① 整体式甲板：上部甲板结构参与平台整体强度。对参与平台整体强度的上部甲板，其载荷和衡准与平台主体相同，强度校核要求见本节；
- ② 非整体式甲板：立柱具有顶部框架，上部甲板通过甲板对接短柱与立柱连接，并释放一定的自由度，使得上部甲板结构不参与平台整体强度。对于不参与总体强度的上部桁架式结构，可以引入海洋工程导管架上组块的成熟方法进行设计，校核可依照本章第 8 节相关要求进行。

(2) 本节给出了平台浮箱、立柱、整体式甲板以及立柱顶部框架的强度校核要求，对非整体式的上部甲板，其强度校核见本章第 8 节。

(3) 应提交验证结构强度（包括浮箱、立柱、整体式甲板、立柱顶部框架、以及主要结构之间连接结构的屈服、屈曲和疲劳强度）需要的文件，以供审查。

(4) 本节标准涉及到对本章第 6 节中所选择尺寸的验证，但本节中的分析结果不能降低本章第 6 节中求得的最小构件尺寸。

(5) 应根据本指南第 5、6、7 章的要求进行张力筋腱系统、海底基础、机械/设备基座和附件的结构构件设计。

4.7.2 整体强度分析

(1) 使用以下载荷和环境条件进行下浮体、整体式甲板、立柱、立柱顶部框架（如适用）等主要结构的分析。考虑所有模式的操作工况，用于确定危险的情况。提交危险条件的计算结果以供检验。业主应提供设计环境条件，且所选取的环境条件不应低于表 4.7.2 的要求。表 4.7.2 所示为在整体分析中对于每种设计工况需要考虑的环境条件和安全系数。

表 4.7.2 需要考虑的环境条件和安全系数

设计条件	环境条件	安全系数		
		杆件轴向或者弯曲应力	板单元中心膜应力的 von Mises 应力	剪切应力
装船	无风条件或由设计者或业主指定	1.67	1.43	2.50
远洋拖航（干拖）	选择拖航路径十年一遇风暴 或 如果按照气象预报选择航线，则环境条件由设计者或业主指定	1.25	1.11	1.88
油田拖航（湿拖）	选择拖航路径一年一遇风暴或由设计者或业主指定	1.25	1.11	1.88
组块安装	平静环境条件（见 3.4.6）或由设计者或业主指定	1.67	1.43	2.50
在位作业工况	一年一遇风暴（至少）	1.67	1.43	2.50
在位极端工况	百年一遇风暴	1.25	1.11	1.88
在位破损工况	一年一遇风暴（至少）	1.25	1.11	1.88
在位自存工况	千年一遇风暴（至少）	1.00 或业主确定	1.00 或者业主确定	1.54 或者业主确定

(2) 整体强度工况筛选

下浮体整体强度设计要能承受包括本指南第 3 章中定义的载荷。控制下浮体强度设计的载荷效应包括分离力/挤压载荷、惯性力载荷、扭距以及筋腱最大张力。控制组块甲板强度设计的载荷除了控制下浮体设计的载荷以外还包括波浪引起的加速度。

为了确保得到最严重的响应，需要使用足够多的设计工况，应考虑但不仅限于以下因素的变化：

- ① 环境条件及方向；
- ② 可变载荷（甲板有效载荷）；
- ③ 压载分布；
- ④ 立管布置；
- ⑤ 钻井模块的位置。

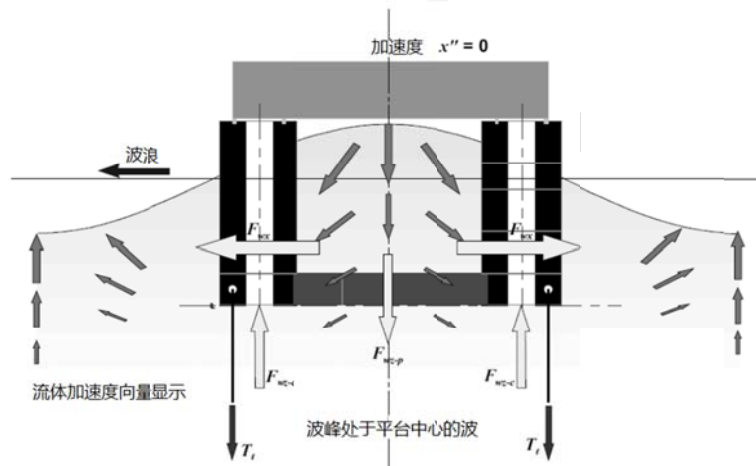


图 4.7.2 (1) 波浪造成的分离力

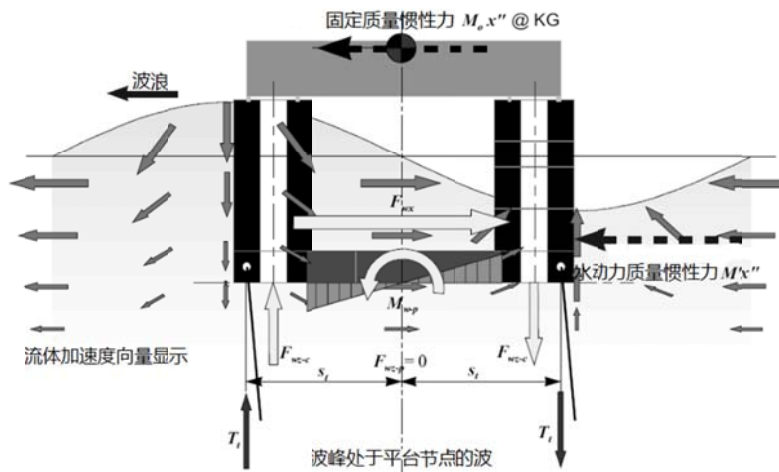


图 4.7.2 (2) 波浪造成的扭矩

4.7.3 关键节点分析

由于整体强度分析模型很难准确获取主要连接处的细节，在设计这些连接区域时要求进行局部有限元分析。这些连接区域主要包括立柱与浮箱连接、立柱与组块甲板连接、立柱与立柱顶部框架连接、立柱顶部框架和组块甲板结构连接节点。

4.7.4 疲劳强度分析

疲劳分析用于确保张力腿平台在设计生命周期里具有足够的强度抵御疲劳失效。疲劳分析需要考虑张力腿平台包括运输和在位条件下的整个加载历史。特别要关注 4.7.3 提到的主要节点。

设计中也要关注结构缺口、开口、附属构件和结构中易于发生疲劳破坏的突变部分。

4.7.5 结构冗余度分析

为了保证在表 4.7.2 定义的破损条件下结构能进行足够的应力再分配，需要进行冗余度分析。破坏条件也需要考虑失去某个舱室浮力或者移除一根筋腱的情况。

4.7.6 强度衡准

整体结构和局部细节的所有分析都需要按照表 4.7.2 中指定的设计条件并结合材料屈服、屈曲和疲劳失效模式进行。

① 材料屈服

参与结构分析的平台主体框架的结构构件应按以下规定确定其许用应力值：

$$[\sigma] = \sigma_s / S \quad \text{N/mm}^2$$

式中： σ_s ——材料的屈服强度， N/mm^2 ；

S ——安全系数，按表 4.7.2 取用。

其中，屈服强度为指定的材料最小屈服点或者屈服应力，单元的 von Mises 应力取为单元中心的膜应力。

② 屈曲

对于下浮体、整体式甲板和立柱顶部框架，可使用 CCS《海洋工程结构物屈曲强度评估指南》给定的屈曲失效准则以及安全系数。也可以采用业界公认的屈曲评估指南，如美国石油学会出版的《平板结构设计公告》和《圆柱壳稳定性设计公告》。

③ 疲劳

对于下浮体，包括本节 4.7.3 中定义的主要连接，疲劳强度校核可使用 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》第 2 章第 5 节中定义的空气、海水带阴极保护和自由腐蚀 S-N 曲线，也可采用其他业界公认的标准。

对于整体式甲板和立柱顶部框架，可使用 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》指定的 S-N 曲线和 AWS S-N 曲线。

设计疲劳寿命由安全系数和张力腿平台设计寿命决定。安全系数由检查、维修、冗余度、预测失效破坏能力和结构疲劳失效后果所决定。需要的最小安全系数如表 4.7.6 所示。

表 4.7.6 下浮体、整体式甲板、立柱顶部框架疲劳寿命安全系数

重要性	可检查和现场维护
-----	----------

	是	否
不重要	3	5
重要	5	10

注：“重要”意味着这些结构的失效将会导致结构完整性的快速丧失，产生不可接受的后果。

任何被认作对结构“重要”的区域，不能存在裂缝，应力集中系数要确定且最小化。“重要”区域需要特别分析和研究。

第 8 节 非整体式甲板结构强度

4.8.1 一般要求

(1) 非整体式甲板结构构件（如甲板桁材、立柱、梁、撑杆、骨材和甲板板等）的设计载荷工况按照本节 4.8.2 确定，且结构响应结果不能超过本节 4.8.4 定义的安全准则。

(2) 除了本节涵盖的这些方法和相关安全准则，其他方法和相关安全准则只要证明其计算结果的安全性按本节要求得到的结果安全性相当或者更高，则也允许使用。

4.8.2 载荷工况

在位前和在位条件下，需要考虑对非整体式甲板结构产生最坏影响的载荷。使用本指南第 3 章中所述的环境条件和载荷对在位前和在位条件建立设计工况。表 4.7.2 中的环境条件在甲板设计中也要考虑。在给定组块有效载荷情况下，对组块甲板产生最严重影响的可能是张力腿平台运动产生的加速度和平台倾斜产生的载荷。

4.8.3 结构分析

需要对组块进行空间结构分析以获得结构的响应。结构模型可以是包括详细组块模型的整个张力腿平台模型或者独立的组块结构模型。在独立的组块模型中，模型的边界条件需要在分析中合理模拟。在组块结构建模中，需包含所有的相关结构部分。在设计方法的选择中，应考虑载荷种类、载荷组合以及局部环境条件。分析方法和相关的假设应与整体设计原则一致。

4.8.4 强度衡准

安全准则以基础许用应力的形式给出，并结合以下指定的要求：

- ① 对于管状构件，应力极限应与美国石油学会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计方法》中要求一致。其他类型的构件基本许用应力通过美国钢结构协会《钢结构手册——许用应力设计方法》获得。对于板结构，设计可参照美国石油学会出版的《平板结构设计公告》和《圆柱壳稳定性设计公告》或者其他认可的行业标准执行。
- ② 在位极端工况（设计环境条件结合固定载荷和活载荷）的计算中，引自①中的许用应力可增加 1/3，但此时计算得出的结构构件尺寸应不小于在位作业工况（操作环境条件结合固定载荷及活载荷）且不考虑许用应力增加 1/3 后所得的结构尺寸。
- ③ 除了吊装和装船工况不允许增加 1/3 的基本许用应力之外，本条上述②中指定的许用应力可作为本指南第 3 章所覆盖的海上作业条件下结构应力极限。起吊分析需要考虑因使用美国石油学会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计方法》推荐的动力放大系数而导致的设备和制造重量的增量。

- ④ 对于采用工作应力法求得的二维或三维应力场，使用等效应力（例如 von Mises 应力强度）进行设计。对于在位作业工况，许用 von Mises 应力取屈服强度的 0.7 倍；对于在位极端工况，许用 von Mises 应力取屈服强度的 0.9 倍。
- ⑤ 只要整体或局部的弹性失稳出现在应力达到基本许用应力之前，则许用屈服应力起到控制作用。

4.8.5 疲劳强度

对组块结构要进行详细疲劳分析。如果力和构件应力可以合理表达，则其他合理的疲劳分析方法也可以接受。如果载荷动力效应对结构响应影响比较明显，则也需要考虑。对于组块上的框架构件，推荐使用 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》和美国石油学会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计方法》中定义的 S-N 曲线。管节点的应力集中系数（SCFs）可以通过适用的经验公式得到。对于复杂重要的连接，应力集中系数可以通过细化的有限元分析方式计算得到。

表 4.8.5 提供了疲劳设计需要的安全系数。对于组块和下浮体的连接，其疲劳安全系数参见表 4.7.6。

表 4.8.5 上部组块结构疲劳寿命安全系数

重要性	可检查和现场维护	
	是	否
不重要	2	5
重要	3	10

注：“重要”意味着这些结构的失效将会导致结构完整性的快速丧失，产生不可接受的后果。

任何被认作对结构“重要”的区域，不能存在裂缝，应力集中系数要确定且最小化。“重要”区域需要特别分析和研究。

4.8.6 节点强度

结构间的连接构件需要确保连接构件间的载荷有效传递，减小应力集中，防止过度的冲剪。连接细节的设计要使得其对于整体延性行为的不合理约束最小，并使得焊接后的收缩影响最小，且应避免不合理的焊道集中。管节点的设计可依据美国石油学会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计方法》相关要求，包括冲剪应力校核。非管节点的设计可参考美国钢结构协会的《钢结构手册——许用应力设计方法》。

第 5 章 张力腿系统

第 1 节 一般规定

5.1.1 一般要求

张力腿系统应符合本章的相关要求，也可参考美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》的相关要求。张力筋腱的一般构成如图 5.1.1 所示。

5.1.2 适用范围

本章适用于主体由钢管组成的张力筋腱。对于其他形式或其他材料的张力筋腱，需予以特殊考虑。

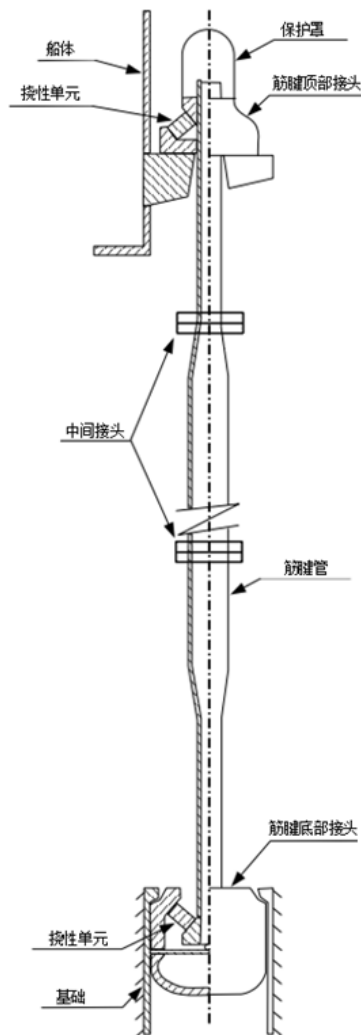


图 5.1.1 张力筋腱的构成

第 2 节 设计原则

5.2.1 一般要求

(1) 张力腿系统基本承载构件的设计应尽量使其可检测、维护、更换和修理。

(2) 张力腿系统的结构构件，应尽量设计为其失效时不会导致张力腿系统的进一步破坏。如果张力腿系统的基本承载构件无法以上述原则进行设计，则设计中需予以特殊关注，以尽早发现失效。

(3) 张力腿系统的构件应有足够的腐蚀保护。对于会发生磨损的滑动表面，应予以足够关注以保护该表面。

5.2.2 顶部连接部件

(1) 筋腱-浮体连接结构相连并锁紧，在需要时也可解开。

(2) 顶部连接部件通常处于水面以下，但当顶部连接部件处于水面以上时，则应对其耐火性和抗爆性进行评估，并予以适当的保护。

5.2.3 底部连接部件

(1) 底部连接部件应可解脱，以便筋腱的移除或更换。

(2) 底部连接部件允许出现适度的筋腱松弛，但不能导致底部连接的意外解脱或张力筋腱发生屈曲。

5.2.4 材料

金属材料 and 挠性单元材料参考美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》的要求。根据具体情况，也可以接受其他公认标准认可的张力筋腱适用材料。

第 3 节 工况

5.3.1 分析工况

(1) 考虑在位前和在位条件下对张力筋腱产生各种不利影响的工况，包括设计载荷工况、偶然载荷工况和地震工况。

(2) 在位条件下需要考虑完整工况和破损工况。完整工况要考虑张力腿平台不同的布置，如是否有钻井装置、张力腿平台上悬挂的立管数量等。破损工况要考虑平台舱室、筋腱的意外进水工况和筋腱移除工况。

(3) 分析的工况应至少包括与以下载荷效应相关的危险工况：

- ① 最大张力；
- ② 最小张力；
- ③ 挠性单元的最大转角；
- ④ 疲劳损伤；
- ⑤ 静水压溃。

第 4 节 张力筋腱分析

5.4.1 静态分析

张力筋腱的静载荷由张力腿平台处于平衡状态时决定，包括张力筋腱预张力、潮汐作用、风和海流作用引起的平台偏移、基础位置允许误差等因素的效应。

5.4.2 动态分析

张力筋腱的动载荷产生于平台运动、地震运动等。平台运动引起的动载荷可由耦合的张力腿平台整体性能分析（即考虑了筋腱同步的弯曲响应）确定。如果整体性能分析不是耦合的（即筋腱以弹簧单元模拟），则需要进行单独的张力筋腱分析，以评估沿筋腱长度的响应分布。

第5节 张力筋腱的最大和最小张力

5.5.1 一般要求

(1) 对本指南要求的工况，计算张力筋腱的最大和最小筋腱张力。在评估最大和最小筋腱张力时，一般需要考虑以下因素：

- ① 在平均水准处的设计预张力；
- ② 由于潮汐和风暴潮引起的海平面上升引起的筋腱张力；
- ③ 由于装载工况和压载条件引起的筋腱张力；
- ④ 张力筋腱的重量和浮力引起的筋腱张力；
- ⑤ 风和海流形成的倾覆力矩引起的筋腱张力；
- ⑥ 由风、波浪慢漂力、海流引起的平台下沉和缓慢变化的偏移而引起的筋腱张力；
- ⑦ 波浪载荷和平均偏移附近的波致平台运动引起的筋腱张力；
- ⑧ 由于高频的垂荡、纵摇、横摇振荡（弹振和鸣振）引起的筋腱张力；
- ⑨ 涡激振动引起的筋腱张力。

(2) 在相关时，需要考虑以下因素引起的筋腱张力：

- ① 温度引起的筋腱热应力；
- ② 筋腱的制造公差，引起重力和浮力的偏差；
- ③ 桩基的安装误差，引起额外的筋腱张力；
- ④ 筋腱张力测量误差，引起实际张力和读数张力的偏差。

5.5.2 最小张力

(1) 在正常作业条件、极端条件和自存条件下，需要对筋腱的最小张力进行校核。

(2) 对于正常作业条件，所有张力筋腱的最小张力应为正值。

(3) 对于极端条件和折减极端条件，如果平台每个角处至少有一根张力筋腱的最小张力为正时，可以接受张力筋腱临时出现负张力。

(4) 对于自存条件，至少有这样的三个角存在，每个角至少有一根张力筋腱的最小张力为正。当所有张力筋腱不能维持正张力时，需要进行张力筋腱的耦合分析，以说明底部接头的再接合是合适的；或者，相关模型试验也可以接受。

(5) 当上述的筋腱临时负张力可接受时，需要进行合适的动态分析，以说明张力损失不会导致筋腱主体、接头或挠性单元产生不可接受的效应。此时，需要对张力筋腱的屈曲和底部挠性单元接头的下冲程进行评估，表明没有因旋转或者垂荡而解锁筋腱。底部接头再接合时引起的应力应予以考虑。

5.5.3 最大张力

张力筋腱的最大张力用于进行筋腱管子、接头和其他部件的强度校核。

第 6 节 筋腱管子

5.6.1 一般要求

筋腱管子的设计应符合美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》的要求。

5.6.2 作用应力

- (1) 张力筋腱的作用应力用于进行强度校核，通过合适的有限元方法计算得到。
- (2) 在计算张力筋腱的最大应力时，一般要考虑张力筋腱的轴向力、弯矩、环向载荷、热应力（如适用时）等的作用。

5.6.3 强度衡准

(1) 强度校核采用美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》中的总体张力-压溃强度衡准，可以采用工作应力设计法，也可以采用荷载抗力系数法作为替代方法。

(2) 对于直径或厚度过渡变化的区域，采用美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》中的局部应力衡准。

5.6.4 筋腱管子的环焊缝

环焊缝的设计参考美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》中的相关要求，包括疲劳和断裂力学、制造、检测、试验等。

第 7 节 筋腱部件

5.7.1 一般要求

(1) 筋腱部件应符合美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》的设计要求和校核衡准。

(2) 张力筋腱的部件（如顶部接头、底部接头、连接器、挠性单元等）需要进行详细的有限元分析。在需要时，进行试验以支持和验证有限元分析。

(3) 有限元分析的载荷由张力筋腱的总体分析获得。在受力严重的区域，如适合，需要采用三维模型来量化三维的作用效应。

(4) 通过对最危险工况的分析，考虑制造公差对连接和部件应力的影响。

(5) 对于关键区域，需要评估净截面等效 von Mises 应力和局部的弯曲应力。

(6) 通过详细的有限元分析，计算部件的峰值应力，进而确定应力集中系数（峰值应力/名义应力），以用于疲劳评估。

第 8 节 疲劳分析

5.8.1 一般要求

- (1) 应对张力筋腱进行疲劳损伤计算，以验证张力筋腱具备足够的疲劳寿命。

(2) 通常,设计阶段的疲劳寿命计算采用 S-N 曲线方法,断裂力学方法用于为张力筋腱焊缝的无损检测确定检验标准。

(3) 疲劳计算需要考虑在张力筋腱预期寿命内的所有海况,以及在位和安装条件下的涡激振动导致的疲劳损伤。

(4) 评估张力筋腱载荷可以采用频域或时域方法。疲劳载荷考虑张力筋腱的总应力,包括由于波频、低频、高频载荷所引起的轴向应力和弯曲应力。

(5) 根据材料、焊接细节、工艺、质量控制和阴极保护水平,选择合适的 S-N 曲线。

(6) 由参数公式或者局部有限元分析,确定合适的张力筋腱的管子和部件的应力集中系数。

(7) 张力筋腱湿拖和其他与张力筋腱相关的在位前条件产生的疲劳损伤,应予以考虑。

(8) 对于与桩相连的筋腱接收装置和其他部件,考虑在打桩过程中产生的疲劳损伤。

(9) 计算累计疲劳损伤时,可采用线性 Palmgren-Miner 方法。

(10) 张力筋腱的计算疲劳寿命应不小于筋腱服役寿命的 10 倍。

5.8.2 断裂力学计算

(1) 张力筋腱应具有足够的断裂韧性,以防止缺陷于某一期间内由于极端设计载荷作用发生不稳定的裂纹扩展,该期间可取为筋腱检验周期和 5 倍筋腱设计寿命两者中的小者。缺陷类型可能包括筋腱表面缺陷、筋腱管表面下层缺陷和穿透裂纹。

(2) 断裂力学分析可依据英国标准《金属结构缺陷验收评定方法导则》或 CCS 认可的其他等效标准,美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》的相关要求也应予以考虑。

第 9 节 防腐

5.9.1 一般要求

(1) 张力筋腱应采用涂层和阴极保护方法以避免腐蚀。

(2) 当海水环境中存在特殊污染物时,需要考虑这些污染物对腐蚀的特殊影响。

第6章 海底基础

第1节 一般要求

6.1.1 一般规定

(1) 基础系统是指用于将张力筋腱固定到海底的基础。筋腱可直接和独立桩相连，或者锚定在被桩固定的基盘结构上，或锚定在重力基盘上。

(2) 适用于张力腿平台的基础形式主要有桩基式、吸力式和重力式。基础形式的选择要根据土壤情况、桩基及载荷的特性综合考虑。

- ① 桩基式基础是张力腿平台的主要基础形式，它不仅能承受水平载荷，也能抵抗垂向载荷，适用于坚硬的地质。
- ② 吸力式基础使用吸力锚，又称为负压锚，主要适用于黏土型地质，也可以用于细沙或颗粒层，能承受很高的水平和垂向载荷。
- ③ 重力式基础使用重力锚，由混凝土块或钢块、碎金属或其他高密度材料制成。裙板依靠其自重穿透，设计的提升能力取决于锚的湿重，其承受水平负荷的能力是锚与地质之间的摩擦力以及锚下地质的剪切强度函数。重力锚适用于小型系泊系统。

(3) 基础系统的设计和选址通常参照美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》基础分析和设计章节相关要求。选址需要进行详细的地质调查，包括海床和浅地层地质地球物理调查以及岩土工程勘测。

第2节 场地调查

6.2.1 一般规定

(1) 场地调查应考虑所安装平台的基本类型和功能、以前场地调查数据的有效性及其质量、基础失效后果等因素。

(2) 土壤样本从深水中提取后，由于孔隙静水压力下降和溶解气体释放，土壤属性会发生显著变化，应在原址或在特定的实验室中测试土壤的属性。

(3) 与典型导管架平台桩基不同，张力腿平台基础主要承受向上的载荷，需要测试在循环载荷作用下，桩土的相互作用。另外，基础长期承受拉力，可能产生拉伸蠕变效应，需要进行额外的实验来测试长期受到拉伸载荷作用下的桩土响应。

(4) 场地调查应由业主负责进行。

第3节 基础设计

6.3.1 一般规定

(1) 基础设计承受的载荷主要来自于筋腱。基础设计中需要考虑极端条件、作业条件、以及筋腱移除条件下的响应。适用时，基础系统还应该考虑基础安装的位移偏差。

(2) 桩土分析中，桩的轴向承载能力要和受到的表面摩擦力相平衡。评估桩轴向承载

能力时，应考虑持续拉伸载荷的循环衰减、桩的轴向伸缩、持续拉伸载荷效应（如蠕变）、群桩效应和由于后期变形、冲刷、土壤液化等导致的间隙所产生的轴向承载能力的衰减。

（3）桩土固结（Set-up）分析用来评估桩土稳定固结所需要的时间。桩设计贯穿深度由安装完成后桩的轴向承载力决定。

（4）桩结构承受周期性的拉伸载荷作用，应评估疲劳寿命，主要考虑在位和打桩过程的疲劳损伤。

（5）打桩分析参照美国石油学会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计方法》规范进行，应考虑洋流对桩和打桩锤的影响。

（6）基盘结构和重力式底座结构的分析及校核应符合美国石油学会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计方法》以及美国石油学会《张力腿平台规划、设计和建造的推荐作法》的相关规定。

（7）桩基设计载荷安全系数见下表。若桩基在 seismic 区，系数需特殊考虑。

表 6.3.1 桩基设计载荷安全系数

工况	安全系数
作业工况	2.0
极端工况	1.5
折减的极端条件下筋腱移除或破损工况	1.5

第 4 节 基础安装

6.4.1 一般规定

基础的安装应在 CCS 验船师的检验下进行。基础和张力筋腱连接的安装程序文件应提交 CCS 审查。安装完成后，应提交安装记录和相关分析文件，以证明基础安装达到设计贯穿深度并具有足够的承载力。

第 7 章 机械和其他系统

第 1 节 轮机管系

7.1.1 一般要求

(1) 轮机管系系指那些维持张力腿平台日常操作的系统（例如发电、舱底、压载、舱室通风和测深系统等）。具体可参照但不限于 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇第 3 章所列举的系统。

(2) 轮机管系应尽可能设计成可在露天环境下工作，管路、电缆、控制线缆等应尽量避免穿过张力腿平台浮体。

(3) 轮机管系除本章要求外，还应满足 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇的相关要求。

7.1.2 舱底系统

舱底系统的设计应满足 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇第 1 章、第 2 章和第 3 章有关柱稳式平台的适用要求。

7.1.3 泵驱动的压载系统

(1) 压载系统用于对所有的压载舱进行加压载和卸压载。系统中所有的泵和阀均应在最上层水密甲板之上配置遥控操作。

(2) 泵系统的能力应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇第 3 章柱稳式平台的适用要求，并考虑安装期间可能出现的倾角的要求。

(3) 压载系统的正常和应急操作不应因打开水密边界舱口盖或人孔而增加进水的危险。

(4) 泵数量

① 采用泵送式的压载系统，压载系统应至少配置两台独立的压载泵，一台永久性地连接在压载系统上，另一台可以是备用泵。两台压载泵应位于不同舱室。清舱系统也可用于压载系统的部分速率备份；

② 如果在每个压载舱安装了潜入式压载泵，则至少应在平台上配备一个随时可用的备用泵。

7.1.4 压缩空气驱动的压载系统

(1) 由压缩空气驱动的压载系统，应有足够的压缩空气量随时可以用于压载系统。

(2) 如果安装了两台空压机，则一台应由应急配电板供电或由专用发动机驱动。每个空压机都能够提供 100%压载系统所需的压缩空气。如果设置一台空压机，这台空压机应由应急配电板供电或由专用发动机驱动，还应备有压载系统所需的压缩空气量。

(3) 压缩空气量，是指能够将平台从最严重的破损工况或者偶然进水工况调节到正常操作状态的空气容量。

7.1.5 空气管

除了相对较小的隔间外，其他没有配备其他通风装置的舱室、沉箱、空舱、隧道和隔间都应安装固定的排水和空气管路。

7.1.6 测深

测深的要求应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇第 3 章柱稳式平台的适用要求。为了防止多余的走管，可以接受空舱通过空气管测深。如果空气管是密封的，则应提供一个测深用的塞子，以便进行测深。

第 2 节 电气装置

7.2.1 电气装置应满足 CCS《海上浮式装置入级规范》第 6 篇电气装置的相关要求。

7.2.2 涉及到危险区域电气设备的安装还应满足 CCS《海上浮式装置入级规范》第 8 篇第 7 章的要求。

第 3 节 自动化、安全与通讯

7.3.1 自动化、安全与通讯应满足 CCS《海上浮式装置入级规范》第 7 篇自动化、安全与通讯的相关要求。

7.3.2 涉及到的应急关断、火灾探测系统、可燃气体与硫化氢气体探测系统还应满足 CCS《海上浮式装置入级规范》第 8 篇的要求。

第 4 节 消防系统及设备

7.4.1 政府法规要求

张力腿平台消防系统应符合具有管辖权的政府机关的相关规定。例如，位于中国海域的平台的消防系统应符合《海上固定平台安全规则》和《海上浮式储油装置（FPSO）安全规则》对消防系统的规定。

7.4.2 入级要求

对于申请取得船级的张力腿平台，其消防系统应符合 CCS《海上浮式装置入级规范》第 8 篇的规定。

第 5 节 机械和设备

7.5.1 一般要求

(1) 与工艺设施无关的机械和设备应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇的适用要求。

(2) 油气处理设施的机械和设备应符合 CCS《海上浮式装置入级规范》第 4 篇的适用要求。

(3) 钻井设备应符合 CCS《海上钻井装置发证指南》的适用要求。

7.5.2 环境条件

轮机设备和与安全有关的设备的环境条件，应符合 CCS《海上移动平台入级规范》第 4 篇第 1 章柱稳式平台的相应要求。

第 6 节 平台综合监控系统

7.6.1 一般规定

(1) 张力腿平台上宜安装一套永久性的综合监控系统，用于平台完整性管理和风险评估。

(2) 综合监控系统对关键性的环境参数以及浮式生产系统参数进行监控，并归档保存。

(3) 一般情况下综合监控系统宜包括以下几个子系统。此外，根据需要也可以安装立管监控系统。

①平台运动和环境监控

②张力筋腱张力监控

- 一般情况下，每个平台立柱（或每组张力腿筋腱）应至少监控一根筋腱的受力(张力和力矩)；
- 应能设置每个作业工况下的张力允许范围；当检测到的张力超出允许范围时，系统应至少在中控室内自动报警。

③荷载监控与管理系统，应满足但不限于以下要求：

- 系统应为故障安全型。系统运作应由不间断电源供电；
- 能够记录和监控平台重量和重心的变化；
- 设置各类荷载容许变化范围，并在检测结果超出容许范围的情况下自动报警；
- 根据重量、重心及张力腿的张力，计算压载水的分布；
- 数据必须连续备份，重要数据应经常保存。

附录 A 张力腿平台总体性能和水动力载荷分析参考方法

第 1 节 概述

本附录基于张力腿平台在风、流和波浪环境条件下受到的环境载荷以及由此产生的响应，对完整张力腿平台系统进行水动力性能计算和结构响应计算，包括平台主体结构、张力筋腱、立管等各类设计问题采用的直接计算数值分析方法进行阐述，并给出相应指导意见。

A.1.1 张力腿平台的特点

张力腿平台与其他浮式平台相比，最大特点是张力腿平台排水量大于平台自身重量，需要通过张紧系泊的筋腱提供张力保持平衡。这样的设计使得张力腿平台垂向运动（垂荡、纵摇和横摇）固有周期小于 5s（通常为 2~4s），在典型波浪频率范围之外。另一方面，张力腿平台水平运动（纵荡和横荡）固有周期与传统半潜平台类似，大约为 100s。

张力腿平台结构形式和深水作业的特点，会产生一些其他平台所不具有或少有的运动响应，使得张力腿平台总体性能分析比传统浮式平台更为复杂。由于非线性波浪载荷周期与平台响应共振周期很接近，导致张力腿平台两类特殊的高频响应现象发生，即弹振和鸣振。弹振对筋腱疲劳寿命有很大影响，而鸣振主要影响筋腱极端响应。此外，因为张力腿平台立柱和筋腱/立管都是圆柱形，结构构件周围漩涡脱落有可能会引起结构共振振动响应，即筋腱涡激振动和平台主体涡激运动。

(1) 弹振：由于交变载荷位于或接近张力腿平台纵摇或垂荡共振周期而激励张力腿平台系统产生的稳定高频垂向振动。可根据二阶和频波浪理论对弹振响应进行评估，在预报二阶波浪激励力时需要特别关注波浪辐射阻尼、粘性阻尼、筋腱/立管阻尼等不同阻尼成分。

(2) 鸣振：由于陡波、破碎波等大波幅非线性脉冲载荷而激励张力腿平台系统产生的瞬态高频垂向振动。鸣振通常是发生在风暴条件下高度放大的共振响应，对筋腱最大张力有很大影响。鸣振和弹振本质上是不同的，鸣振发生的频率比（响应固有频域与波浪谱峰频率之比）大于 2，典型比值为 3 到 4，甚至更大，所以鸣振包含了强非线性波浪现象。陡波和破碎波中的波浪爬升效应也会对平台鸣振有影响。

(3) 涡激响应：张力腿平台的涡激响应包括筋腱涡激振动和平台下浮体涡激运动，都是由漩涡脱落引起的结构共振响应。涡激响应强度取决于漩涡脱落频率与系统固有频率的比值。涡激响应发生在与来流同向或者垂直的方向上，通常垂向涡激响应更为显著。涡激响应振动幅值很少会超过结构构件的特征长度，这意味着涡激响应对结构构件的疲劳响应影响要大于对结构极端响应的影响。

第 2 节 水动力分析方法

A.2.1 简介

目前，张力腿平台水动力分析主要采用基于波浪绕射/辐射模型的势流方法。对于含有细长构件的平台，通常会引入莫里森方法作为势流方法的补充。基于求解纳维斯托克斯/欧拉方程的计算流体力学（CFD）方法并不常用于张力腿平台水动力分析，因为现有 CFD 方法对电脑硬件配置要求过高，并且缺乏工程实践证实其有效性。但是，CFD 方法仍可用于解决一些特殊问题，比如：非线性波浪爬升、越浪、波浪砰击等。

张力腿平台水动力分析参数应包括但不限于以下内容：

- (1) 偏移和因偏移引起的垂直下沉；
- (2) 最大艏摇运动；
- (3) 筋腱张力；

- (4) 气隙和波浪爬升;
- (5) 加速度;
- (6) 结构内部载荷;
- (7) 波浪压力。

水动力分析参数取决于张力腿平台结构形式,对于结构形式特殊的张力腿平台,水动力分析参数内容还应根据需要拓展。

A.2.2 莫里森方法

莫里森方法简单实用,但是其适用性有限。莫里森方法根据结构局部流体速度和加速度计算结构受力:

$$F_M = \frac{1}{2} \rho_w C_D D \left(v_F - \frac{d\xi_B}{dt} \right) \left| v_F - \frac{d\xi_B}{dt} \right| + \frac{\rho_w \pi D^2}{4} \left[(1 + C_M) \gamma_F - C_M \frac{d^2 \xi_B}{dt^2} \right]$$

式中:

- ρ_w —— 流体密度;
- C_D —— 拖曳力系数;
- D —— 特征截面尺度 (直径);
- v_F —— 局部流体速度;
- $d\xi_B/dt$ —— 局部结构速度;
- C_M —— 附加质量系数;
- γ_F —— 局部流体加速度;
- $d^2 \xi_B/dt^2$ —— 局部结构加速度。

莫里森理论适用于截面特征尺度远小于波长的细长结构构件波浪载荷计算,无法考虑波浪绕射/辐射效应和高阶绕射效应,其优点在于可以计算非线性拖曳力。莫里森力成分包括附加质量、阻尼和波浪激励力。需要注意,莫里森方程无法计算圆柱结构的垂向力。

A.2.3 波浪绕射/辐射理论

(1) 概述

波浪绕射/辐射理论基于势流假设,通常利用边界元方法进行计算。边界元方法通过在结构湿表面布置源汇、偶极等奇点来求解流场中的速度势。波浪绕射/辐射理论可以用于解决线性问题(一阶问题)、弱非线性问题(二阶问题)和强非线性问题。因为强非线性问题的求解非常复杂,所以通常只在处理特殊问题时予以考虑。本附录只对一阶和二阶问题进行讨论。

该方法适用于大型结构物计算,因为大型结构物特征长度和波浪波长相近,绕射/辐射效应显著。对于大型结构物中存在细长构件的情况,可以采用波浪绕射/辐射理论与莫里森理论结合的方法。波浪绕射/辐射理论模型通常在频域和时域中进行求解,工程设计常采用纯频域方法或者频域-时域结合方法。

根据实际问题,通常将波浪绕射/辐射水动力模型分为以下三类:

- ① 线性水动力模型;
- ② 低频(差频)二阶水动力模型;
- ③ 高频(和频)二阶水动力模型。

需要注意,一阶线性求解是二阶计算的前提,如果一阶问题没有得到解决,二阶计算将无法进行。一阶线性波浪载荷是平台主体结构设计主要控制因素;低频波浪载荷影响平台系泊系统设计和平台偏移、下沉;高阶波浪载荷对筋腱张力和气隙计算影响很大。

(2) 频域线性绕射/辐射数值模型

频域计算效率高,对电脑配置要求不高。实际情况中的波浪波陡较小,基于小波陡的线性化假设是成立的。根据势流假设和线性展开,流场中的速度势可以分为三部分——入射势、绕射势和辐射势。可以通过 A.2.3 节描述的边界元方法求解这三部分速度势。边界元法只需

要划分浮体结构水下部分的表面网格，这相对于需要划分整个流体区域网格的 CFD 方法是一个巨大优势。典型张力腿平台水动力计算网格如图 A.2.3 (1) 所示。

通过边界元法求解结构湿表面水动压力和水动力系数（附加质量、辐射阻尼、波浪激励力），结合张力腿平台回复刚度矩阵（包括静水回复刚度和筋腱回复刚度），可以建立张力腿平台频域运动方程：

$$\{-\omega^2 ([M] + [A]) - i\omega [B] + [C]\} \{\xi\} = \{F\}$$

式中：

ω ——波浪频率；

$[M]$ ——平台质量矩阵；

$[A]$ ——附加质量矩阵；

$[B]$ ——辐射阻尼矩阵；

$[C]$ ——回复刚度矩阵（包括静水回复刚度和筋腱回复刚度）；

$\{\xi\}$ ——平台运动；

$\{F\}$ ——激励载荷（绕射成分和入射成分）。

求解以上运动方程，即可得到张力腿平台运动和任意指定参数的响应幅算子，例如：湿表面压力、指定点加速度、平台弯曲力矩、剪力等。结合特定海域的波浪谱，利用谱分析法可计算得到短期最大响应值。结合波浪散布图，可以计算得到长期最大响应值。

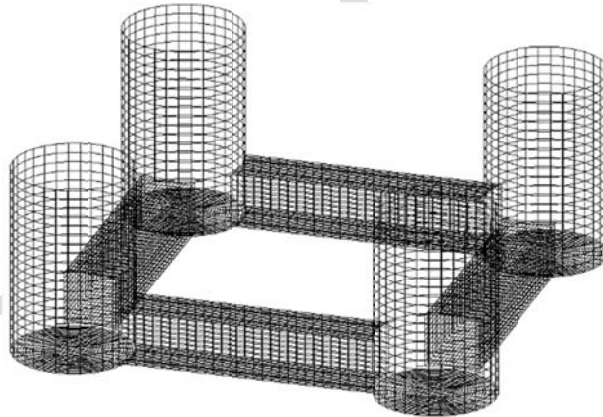


图 A.2.3 (1) 典型 4 柱张力腿平台湿表面网格

(3) 绕射/辐射-莫里森混合模型

波浪绕射/辐射和莫里森混合模型可用于包含细长构件的张力腿平台。该计算模型的思路是利用莫里森方程计算平台细长构件的流体载荷，利用波浪绕射/辐射理论计算平台其他大型结构构件的扰动速度势。因为莫里森方程中存在非线性拖曳力，所以在频域中使用混合模型时需要进行相应的线性化处理。

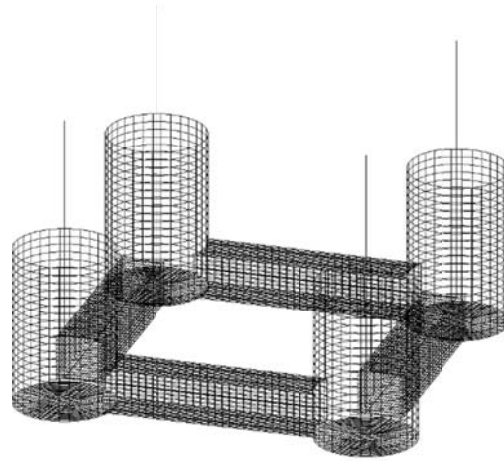


图 A.2.3 (2) 典型张力腿平台绕射/辐射-莫里森混合模型

(4) 频域二阶绕射/辐射数值模型

二阶平均波浪漂移力可以通过线性频域计算得到。二阶平均波浪漂移力对张力腿平台平均偏移和筋腱极端张力有很大影响。但是，平均波浪漂移力不是张力腿平台水平运动唯一控制因素，二阶缓变波浪载荷（二阶差频力）对水平运动也有很大影响。二阶缓变波浪载荷可以通过二阶理论进行求解。

一阶线性波浪理论模型计算得到波频载荷和平均波浪漂移载荷，二阶波浪理论模型可以求解得到高频和低频波浪载荷。

关于二阶问题的计算理论已经十分成熟，但是目前能够精确进行二阶计算的数值方法还很少。线性问题能够在每个频率独立进行求解，但是二阶问题求解时需要考虑两个线性波浪系统的相互影响——来自两个不同方向不同频率波浪的相互作用，这使得求解二阶问题变得很复杂。

采用数值方法精确求解二阶载荷时，需要划分浮体水线面附近区域自由液面网格，自由液面网格的划分要确保数值求解的准确性和收敛性。图 A.2.3 (3) 是典型张力腿平台水线面附近区域的自由液面网格。

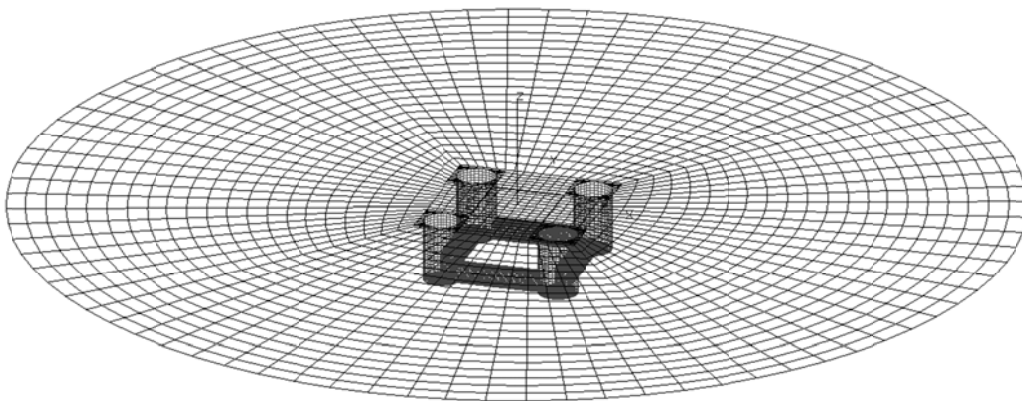


图 A.2.3 (3) 典型张力腿平台自由液面网格

假设两个单色波的频率为 (ω_i, ω_j) ，波幅为 (A_i, A_j) ，波浪方向为 (β_i, β_j) ，那么产生的二阶载荷为：

$$F^{(2)}(t) = F_-^{(2)}(t) + F_+^{(2)}(t)$$

式中：

$$F_-^{(2)}(t) \text{——差频二阶载荷 } F_-^{(2)}(t) = R \left\{ A_i A_j f_-^{(2)}(\omega_i, \omega_j, \beta_i, \beta_j) e^{i[-(\omega_i - \omega_j)t + \theta_i - \theta_j]} \right\};$$

$F_+^{(2)}(t)$ ——和频二阶载荷 $F_+^{(2)}(t) = R \left\{ A_i A_j f_+^{(2)}(\omega_i, \omega_j, \beta_i, \beta_j) e^{i[-(\omega_i + \omega_j)t + \theta_i - \theta_j]} \right\}$;

$f_-^{(2)}(t)$ 、 $f_+^{(2)}(t)$ ——二次传递函数;

θ_i 、 θ_j ——两个入射波相位;

$R\{x\}$ ——变量 x 实部。

复数 $f_-^{(2)}(t)$ 和 $f_+^{(2)}(t)$ 为二次传递函数 (QTF, quadratic transfer functions), 是数值求解的关键点和难点。复杂的二阶边界值问题求解需要考虑浪向和频率的所有组合。对于特殊情况, 两个波浪方向相同 ($\beta_i = \beta_j$) 和频率一样 ($\omega_i = \omega_j$), 上面计算的二阶载荷将变为二阶平均波浪漂移力和二阶倍频力。

A.2.4 时域模型

(1) 概述

频域方法求解速度快, 但是需要将问题进行线性化处理——忽略非线性问题或者进行线性近似。对于二阶频域模型, 可以考虑部分非线性问题, 但是这会导致相应边界值的数值计算变得非常复杂。

时域分析直接对时间项进行积分, 可以在每个时间步进行积分时考虑系统非线性项。张力腿平台模型中存在的非线性效应根据其机械特征和水动力特性分为两类。水动力特性非线性效应包括高阶波浪效应 (二阶绕射、鸣振)、非线性静水力和非势流效应 (莫里森载荷、涡激振动和涡激运动等)。机械特征非线性效应包括系泊系统非线性、平台大尺度运动、立管和筋腱动态效应。

时域数值计算思路: 先进行线性频域计算, 再通过傅里叶变换将线性频域计算得到的结果转换到时域中, 这样就可以在每个时间步积分时加入非线性项。该方法优点是利用频域计算效率高、速度快的特点, 快速求解水动力载荷中最重要的线性部分, 然后再将复杂的非线性项在时域中进行计算。可以将 A.2.3 节张力腿平台频域运动方程转换为等效时域运动方程:

$$\left([M] + [A^\infty] \right) \left\{ \frac{d^2 \xi}{dt^2} \right\} + ([C]) \{ \xi(t) \} + \int_0^t [K(t-\tau)] \left\{ \frac{d\xi}{dt}(\tau) \right\} d\tau = \{ F(t) \} + \{ Q(t) \}$$

方程左侧各项可以由频域水动力计算得到, 方程右侧 $F(t)$ 表示线性部分波浪激励力, $Q(t)$ 表示不同的非线性项。

求解上述时域运动方程的难点在于非线性项 $Q(t)$ 的计算, 它由运动方程每个时间步的解决定, 如果无法准确地求解时域中复杂的迭代计算, 那么将无法得到运动方程的准确解。目前很难精确求解张力腿平台系统的所有非线性项, 尤其是水动力非线性项。所以会采用部分耦合模型进行计算, 即在计算时只考虑影响较大的非线性项。

(2) 非耦合时域模型

简单的时域分析方法是采用非耦合时域模型进行计算, 假设筋腱/立管动态响应与平台动态响应之间没有相互作用, 筋腱/立管惯性载荷近似等价于平台惯性载荷, 筋腱/立管回复刚度采用简单弹簧模型模拟。

(3) 耦合时域模型

耦合时域模型 (图 A.2.4) 中包括了以下非线性项:

- ① 筋腱/立管动态运动与平台动态运动的耦合;
- ② 平台大尺度运动;
- ③ 平台立柱和筋腱/立管的拖曳力;
- ④ 大波陡波浪引起的非线性水动力效应;
- ⑤ 筋腱系泊系统非线性效应。

A.2.4 (1) 中运动方程的 $Q(t)$ 包括上述非常重要的非线性项, 在计算时应特别注意。

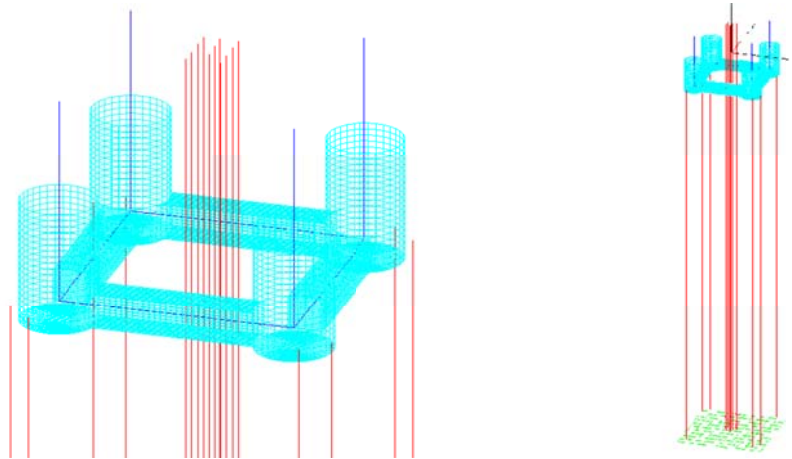


图 A.2.4 典型张力腿平台时域耦合模型

A.2.5 水动力模型试验

水动力水池模型试验是张力腿平台设计过程中非常重要的环节。由于数值计算方法和水池模型试验都存在局限性，所以在设计过程中应将数值计算方法和水池模型试验互相补充结合。前文已讨论了数值计算方法的局限性，以下列出模型试验的局限性：

(1) 尺度效应：水池试验通常基于傅汝德数相似，对于雷诺数作为控制参数的现象无法正确模拟，例如拖曳力、流动分离现象等。除此之外，筋腱/立管动态效应无法通过适当的缩尺比模拟得到

(2) 模型水池尺度限制：有可能产生波浪壁面反射，对试验结果有很大干扰

(3) 模型水池水深限制：水池水深无法完全匹配张力腿平台缩尺比，需要进行截断处理

(4) 测量仪器的准确性

(5) 采样数据的有限性

(6) 高成本

通过水池模型试验可以评估张力腿平台运动、筋腱/立管运动、平台结构载荷、平台气隙、安装过程、涡激振动等。

正如前文所述，水池模型试验和数值计算是互相补充的，所以更为有效的做法是利用模型试验结果对数值计算结果进行修正，再利用数值计算结果对模型试验的工况数进行筛选。

第 3 节 其他环境载荷

A.3.1 风

风是张力腿平台设计过程中非常重要的载荷。风载荷可以分为定常部分和脉动部分。脉动风载荷可用风谱进行描述。风设计条件由平台工作区域实测得到的数据决定。风速和风向随时间变化使得问题复杂化。

风载荷主要影响张力腿平台水平慢漂运动。时域耦合运动方程中应包括风载荷，其对张力腿平台最大偏移、平均偏移和下沉有很大影响。

风力与结构构件的形状系数有关，与相对风速成正比。可采用以下的方法计算风力：

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a C_s A \left| V + v' - \frac{dx}{dt} \right| \left(V + v' - \frac{dx}{dt} \right)$$

式中：

ρ_a ——空气密度；

C_s ——形状系数；

A ——特征面积；

V ——平均风速；

v' ——扰动风速；
 dx/dt ——结构构件速度。

形状系数与结构构件形状和受风面积有关，可依据工程经验决定，也可由风洞试验得到。图 A.3.1 是典型张力腿平台风力曲线。

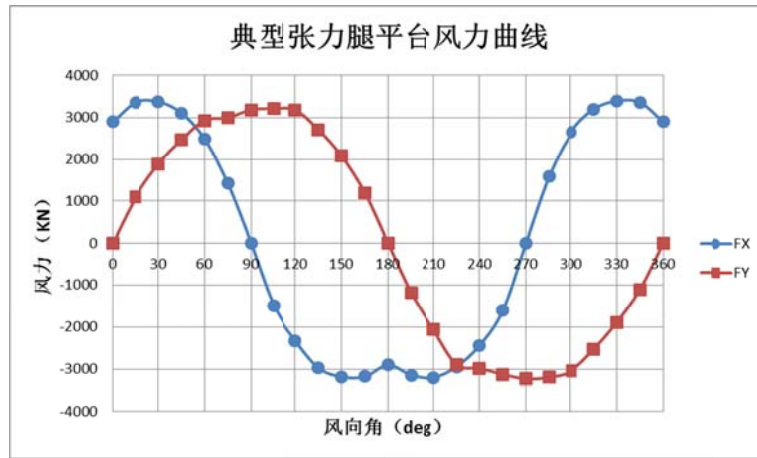


图 A.3.1 典型张力腿平台风力曲线

A.3.2 流

张力腿平台设计过程中流载荷也非常重要，流设计条件由平台工作区域实测得到的数据决定。实测海流资料中通常包含有多种流动成分：风引起的流（风海流）和潮汐产生的流（潮流）等。因为流强度会随水深、方向而变化，故流数据的测量、收集和处理非常复杂。

流载荷对张力腿平台系统影响主要是：

- (1) 拖曳力
- (2) 涡激响应（涡激振动和涡激运动）

由此可见，流载荷对张力腿平台主体设计和筋腱/立管设计都有影响。流力计算与风力计算相似，流产生的拖曳力计算公式如下：

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w \int_L C_d A_c \left| U - \frac{dx}{dt} \right| \left(U - \frac{dx}{dt} \right) dl$$

式中：

ρ_w ——流体密度；
 L ——细长构件的总长（筋腱/立管）；
 C_d ——拖曳力系数；
 A_c ——特征截面面积；
 U ——流速；
 $\frac{dx}{dt}$ ——结构构件速度。

流不仅产生稳定的拖曳力，也会产生低频激振力和阻尼，流阻尼对张力腿平台慢漂运动非常重要。图 A.3.2 是典型张力腿平台流力曲线。

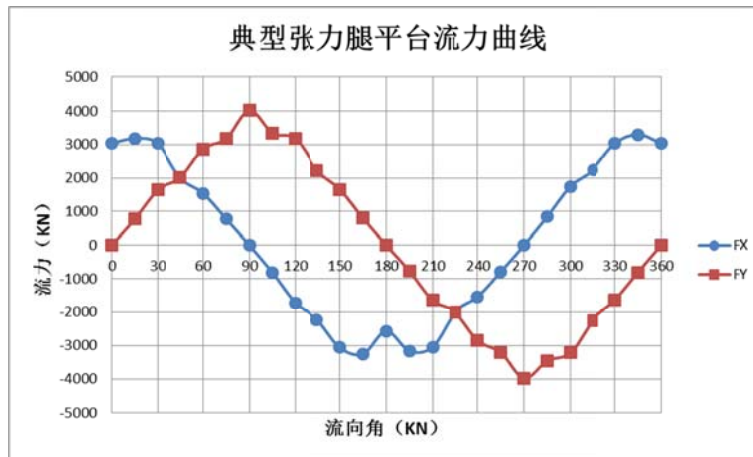


图 A.3.2 典型张力腿平台流力曲线

第 4 节 结构水动力载荷

A.4.1 简介

为了评估张力腿平台的结构设计，结构分析前需进行平台的水动力载荷计算。结构水动力载荷计算包括结构极端响应（屈服和屈曲）和关键节点疲劳响应的载荷计算。张力腿平台不同结构部位的关注点和典型加载条件不同。结构分析需要将平台主体结构 and 筋腱结构分开进行。筋腱连接部位及其周围区域的结构分析，应使用主体结构和筋腱结构相结合的分析方法。

平台主体的结构极端响应和疲劳响应计算可采用直接方法进行。为有效控制计算时间，可采用频域与时域混合的方法计算结构水动力载荷。

A.4.2 张力腿平台主体结构极端响应

(1) 方法步骤

为了计算极端条件下平台结构响应，引入等效设计波的概念。等效设计波法主要步骤如下：

- ① 关键载荷参数的短期/长期预报值；
- ② 计算等效设计波；
- ③ 结构水动力载荷计算；
- ④ 特定结构屈服与屈曲校核。

(2) 关键载荷参数的短期/长期预报

因为需要用有限的载荷参数覆盖所有结构单元中最关键的承载情况，所以定义关键载荷参数是非常重要的。张力腿平台载荷参数的确定取决于平台类型和工程经验。

下面列举传统式张力腿平台（见 1.3.2 定义）的典型载荷参数：

- ① 立柱间的分离力；
- ② 平台关于水平横轴的扭矩；
- ③ 浮箱间的纵向剪力；
- ④ 上部模块的纵向加速度；
- ⑤ 上部模块的横向加速度；
- ⑥ 上部模块的垂向加速度；
- ⑦ 浮箱的垂向波浪弯矩。

上述所有载荷参数均通过水动力分析得到。为了计算每个载荷参数的短期/长期预报值，需要使用线性波浪绕射/辐射理论进行频域计算。波浪频率和方向的范围和数量应根据波浪散布图和其他环境条件来决定，应确保计算的准确性，通常每个波浪方向至少包括 50 个频率。通过频域计算得到各载荷参数响应传递函数（RAO），再采用谱分析方法预报波浪散布

图中各海况的响应值，最后得到载荷参数的短期/长期预报值。

(3) 等效设计波

等效设计波波幅可由载荷参数短期/长期预报极值除以其最大 RAO 值得到。每个载荷参数的等效设计波都包含波长、方向和波幅信息。因为计算得到的等效设计波最大波长结果过于保守，所以需要根据工程经验进行调整。

(4) 结构水动力载荷加载分析

当等效设计波参数确定后，就可以将水动力载荷由水动力模型传递到结构有限元模型，这些载荷包括：

- ① 湿表面水动压力；
- ② 惯性载荷；
- ③ 筋腱载荷。

传递到结构有限元模型后，要确保这三部分不同的载荷是平衡的。这是整个结构水动力载荷分析过程中非常关键的一步，应当给予足够重视。

因载荷参数的短期/长期预报值是基于线性频域理论分析得到，故在使用等效设计波进行结构分析时还需要考虑弱非线性效应，包括非线性 F-K 力、非线性静水力和平台大尺度运动。

对于平台结构存在细长构件，需要使用莫里森方程计算载荷时，莫里森载荷也应当有效地传递到结构有限元模型，并确保有限元结构模型保持平衡。

A.4.3 下浮体结构细节疲劳分析

下浮体结构细节疲劳分析使用谱疲劳分析方法，流程如下：

- (1) 结构关键细节的确定；
- (2) 典型载荷条件的确定；
- (3) 线性总体结构效应的频域计算；
- (4) 在结构细节的精细网格中，提取上下表面应力；
- (5) 谱分析；
- (6) 疲劳损伤计算（S-N 曲线方法和断裂力学方法）。

采用时域计算并结合雨流计数法计算结构细节最终疲劳损伤，但是该方法对计算机配置要求很高，计算效率较低，所以在实际工程设计过程中不常采用。

谱分析方法需要计算大量载荷工况（包括各载荷工况的频率和浪向组合）。分析时应当注意结构有限元模型加载以后的受力平衡（结构表面压力、惯性力和筋腱张力）。在计算上下表面应力时应注意，需要加载局部压力载荷以及施加细网格边界的位移。

A.4.4 筋腱结构分析

与平台主体结构分析一样，筋腱结构分析也包括结构极端响应和疲劳响应分析。筋腱载荷包括静态和动态载荷。

静态载荷成分包含筋腱预张力、稳定风、流和波浪力引起的平台位移、桩基基础安装误差。

动态载荷成分包括平台运动、地震运动、风动态效应、波浪激励载荷和涡激载荷。

筋腱动态轴向和弯曲载荷主要是由平台运动引起。平台运动包括了波频运动、低频慢漂运动和高频弹振、鸣振。

平台运动和筋腱动态响应是非线性耦合的，所以在分析筋腱结构时应采用完全动态耦合的方法。筋腱轴向和横向的共振响应对筋腱极端张力和疲劳寿命有很大影响。

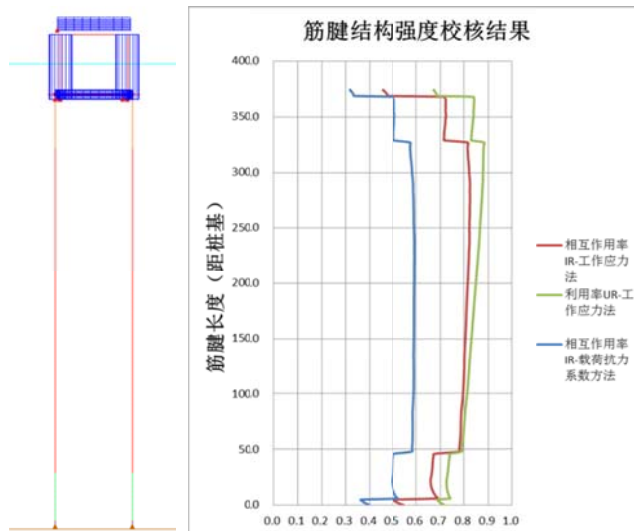


图 A.4.4 典型张力腿平台筋腱结构分析模型和筋腱强度校核结果

第 5 节 张力腿平台水动力参数及分析方法

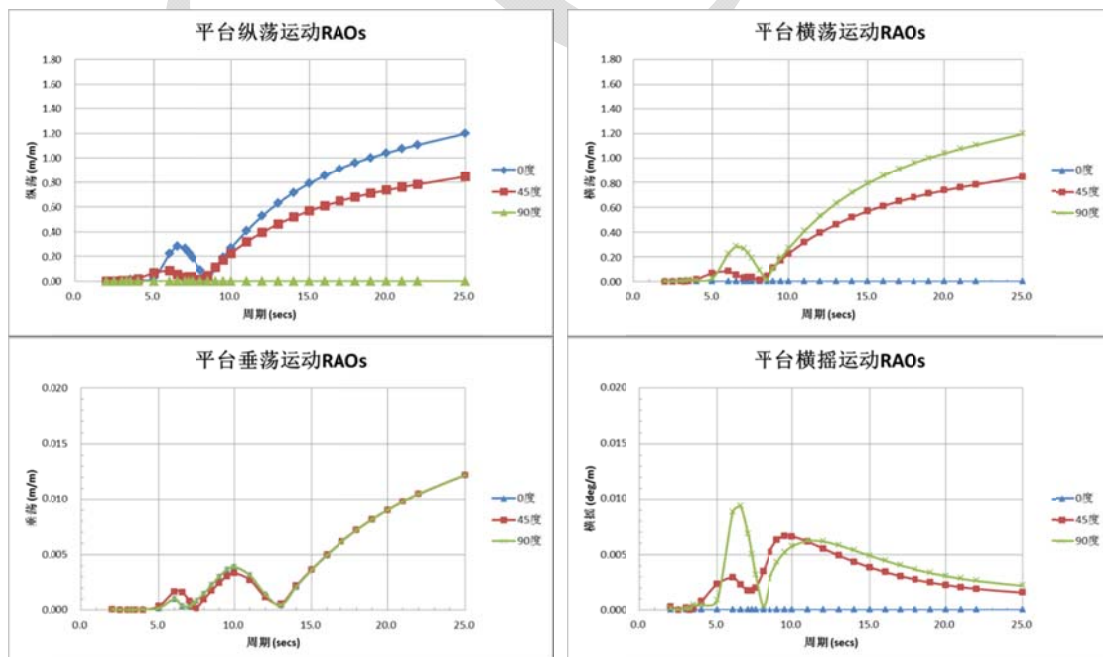
A.5.1 概述

本节列举张力腿平台设计过程中重要的水动力参数,设计中关注的水动力参数应根据平台类型和工作海域特点进行拓展。

A.5.2 水动力参数及分析方法

(1) 平台运动 RAO

频域线性绕射/辐射分析是频域二阶分析和时域耦合分析的基础,张力腿平台整体性能分析第一步就是进行线性绕射/辐射计算。计算时需考虑筋腱回复刚度的影响,可以得到张力腿平台运动、加速度等 RAO。图 A.5.2 (1) 是典型 4 柱张力腿平台运动 RAO。



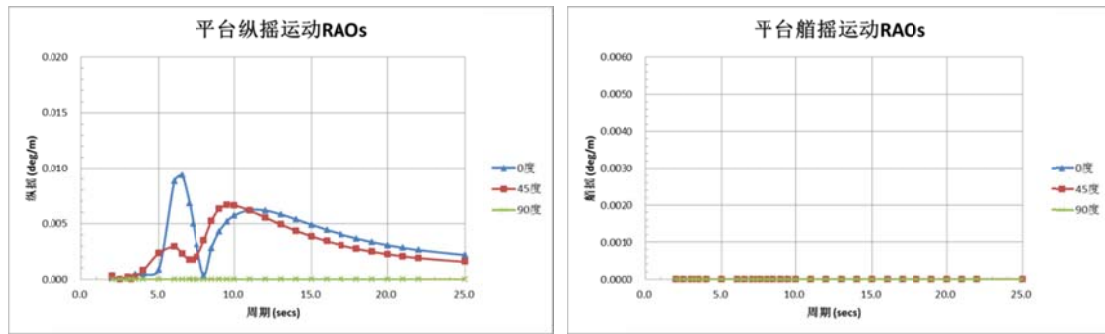


图 A.5.2 (1) 典型 4 柱张力腿平台运动 RAO

(2) 筋腱顶部张力 RAO

筋腱顶部张力 RAO 也是整体性能分析中需要特别关注的参数，建立好张力腿平台与筋腱/立管的耦合模型，通过频域计算方法，可以快速计算得到筋腱顶部张力 RAO。图 A.5.2 (2) 是典型张力腿平台筋腱顶部张力 RAO。筋腱顶部张力 RAO 曲线清楚地显示，在 0~5s 低周期（高频）区域，筋腱顶部张力 RAO 会有明显共振响应，表明高频波浪激励对筋腱顶部张力有很大影响。

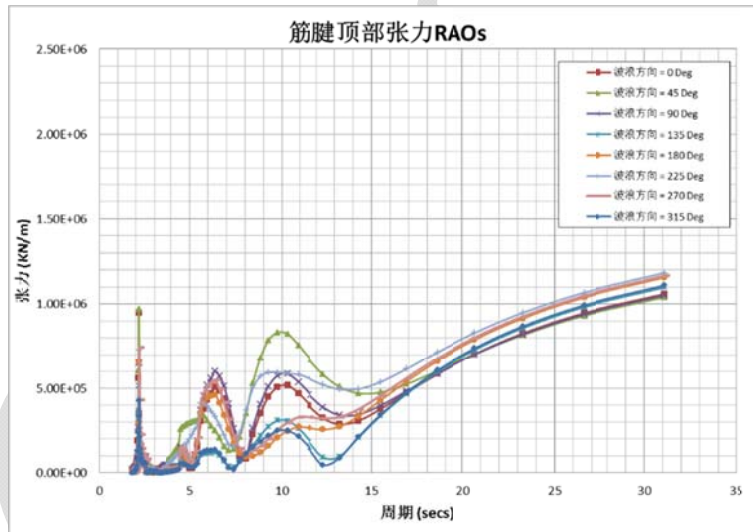


图 A.5.2 (2) 典型张力腿筋腱顶部张力 RAO

(3) 静态偏移分析

静态偏移分析目的是计算张力腿平台系统筋腱系泊回复刚度曲线，通常包括：平台水平位移和筋腱水平回复力曲线、平台水平位移和筋腱顶部张力曲线。

建立好张力腿平台时域耦合数值模型后，对平台施加外力，通过时域迭代计算，可得到平台水平位移、筋腱张力等结果，进而作出张力腿平台系统系泊回复刚度曲线。图 A.5.2 (3) 是典型张力腿平台系统系泊回复刚度曲线，张力腿平台系泊回复刚度呈非线性变化。

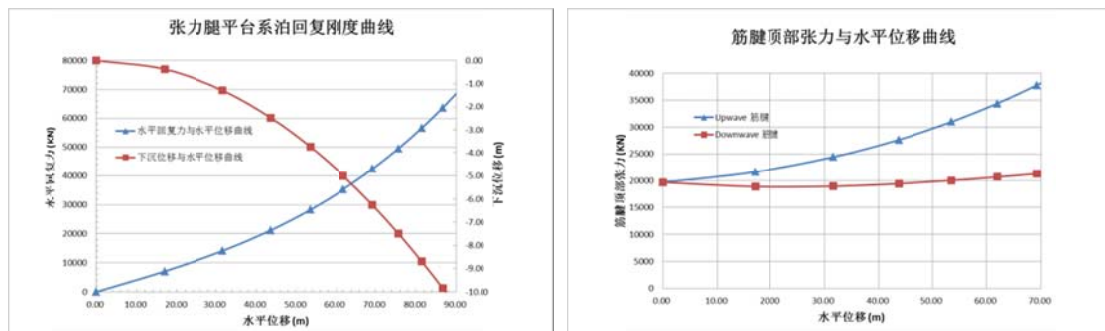


图 A.5.2 (3) 典型张力腿平台系统系泊回复刚度曲线

(4) 自由衰减分析

张力腿平台系统耦合模型建好后,在进行时域动态分析前,有必要对耦合模型进行自由衰减分析,用于确定张力腿平台系统6自由度运动的固有周期和临界阻尼。通常给定平台某个自由度偏离平衡位置的初始位移,进行时域迭代计算,得到该自由度平台自由衰减运动曲线,从而计算得到固有周期和临界阻尼。数值自由衰减结果需要和水池试验的自由衰减结果进行对比分析,并进行相应的修正处理。图 A.5.2 (4) 是典型张力腿平台自由衰减曲线,表 A.5.2 是典型张力腿平台的固有周期和临界阻尼比。

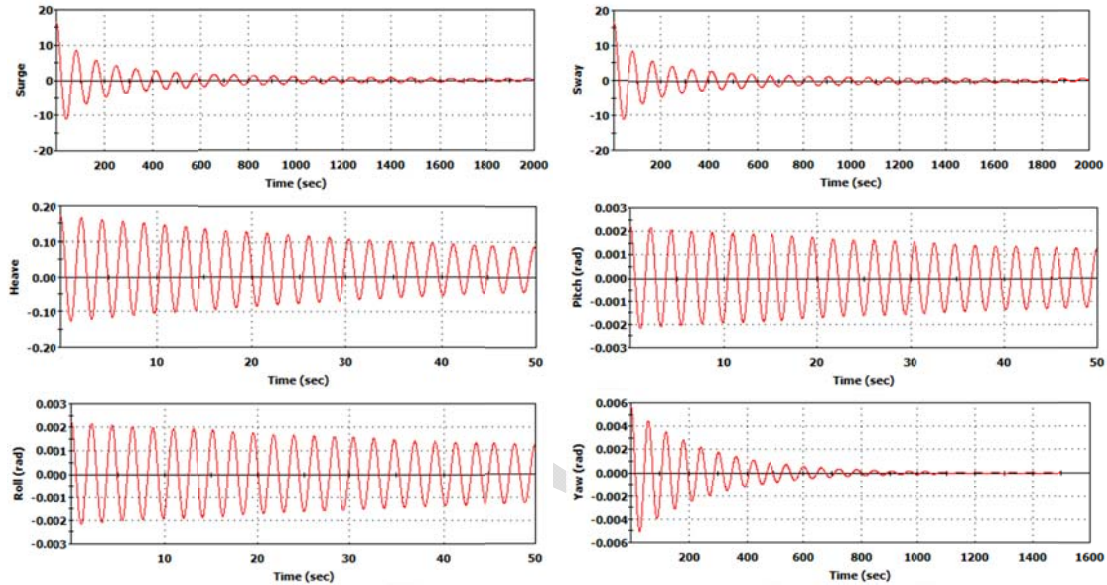


图 A.5.2 (4) 典型张力腿平台系统自由衰减曲线

表 A.5.2 典型张力腿平台临界阻尼比和固有周期

自由度	临界阻尼 (%)	固有周期 (s)
纵荡	2.96	85.00
横荡	2.96	85.10
垂荡	0.44	2.18
横摇	0.41	2.18
纵摇	0.41	2.18
艏摇	3.30	59.70

(5) 偏移和下沉

张力腿平台的最大水平偏移对立管和筋腱分析很重要。因为平台大尺度偏移会使平台下沉增加,所以平台偏移对平台气隙也有影响。

平台初步偏移包括以下载荷导致偏移成分叠加得到平均偏移量:

- ① 潮汐效应
- ② 上部结构平均风力
- ③ 平台主体和筋腱上的平均流力
- ④ 平均二阶漂移力
- ⑤ 筋腱瞬时平均力
- ⑥ 瞬时浮力

时域耦合模拟可以计算得到平台最大偏移和下沉,载荷包括了以下动态部分:

- ① 线性频域效应
- ② 缓变二阶波浪力
- ③ 时变风力
- ④ 时变流力

- ⑤ 非线性平台运动
- ⑥ 非线性静水力
- ⑦ 筋腱非线性载荷

尤其需要关注平台慢漂运动阻尼的计算，包括筋腱/立管和平台拖曳力、波浪漂移阻尼等。

(6) 筋腱张力

筋腱最大和最小张力主要受预张力和环境载荷的影响。轴向预张力大小用于控制平台最大偏移和筋腱最小张力。高频振荡张力对筋腱疲劳起决定作用。此外，筋腱顶部和底部偏转角也是一个重要的设计因素。筋腱最大和最小张力可通过时域动态耦合计算得到。若有必要，需考虑高频鸣振响应对筋腱最大张力的影响。

筋腱疲劳主要受张力腿平台线性波频运动响应和高频弹振响应影响。可以通过时域和频域的方法计算出筋腱顶部运动响应，并以此作为筋腱疲劳分析输入激励。还需考虑流载荷对筋腱运动响应的影响，包括拖曳力和涡激振动。

(7) 气隙和波浪爬升

张力腿平台甲板底部和最大波峰之间应保持一定距离以避免发生波浪砰击。若无法保证张力腿平台气隙为正，则需要对相应结构进行加强以保证其能承受波浪砰击载荷。因为张力腿平台立柱处会发生剧烈的波浪爬升效应，所以在计算气隙时应考虑一阶和高阶的波浪绕射/辐射效应。推荐采用模型试验和数值分析结合的方法对平台气隙性能进行评估。

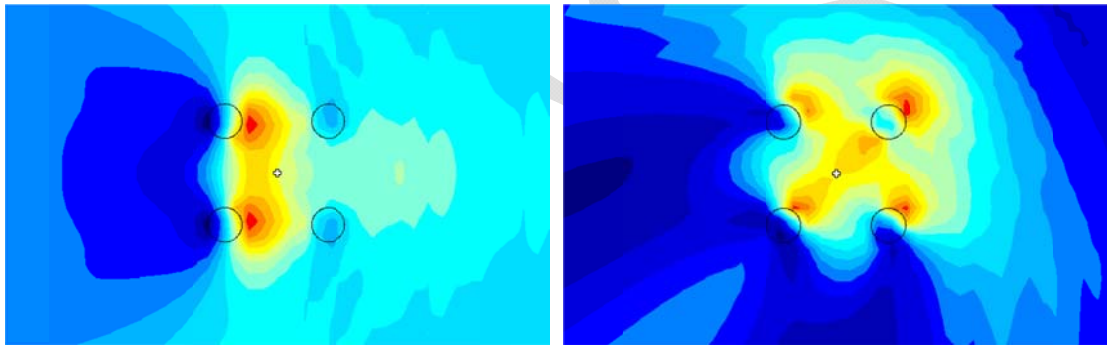


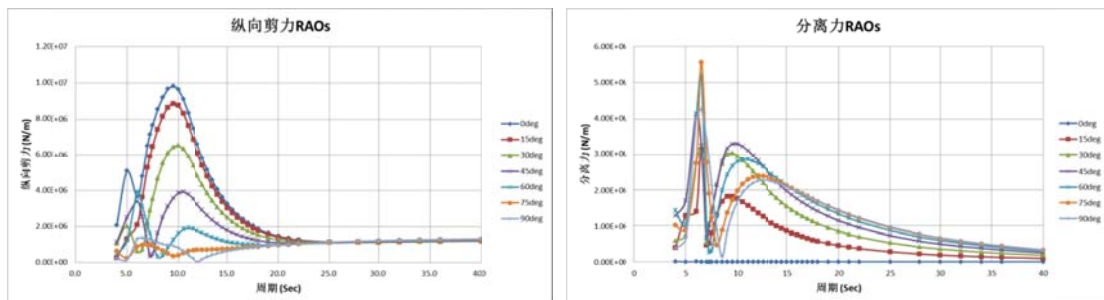
图 A.5.2 (5) 典型张力腿平台气隙云图

(8) 加速度

张力腿平台水平加速度可作为结构和设备设计的控制参数。因为张力腿平台筋腱回复刚度很大，所以平台垂向加速度量级很小。平台最大加速度可采用线性频域方法和动态时域耦合方法计算得到。平台重心、关键设备位置等处加速度值是设计过程中关注的重点，需要输出相应的计算结果。

(9) 平台结构载荷

平台不同结构载荷（分离力、扭矩、剪力、垂向弯矩等）都是很重要的设计参数。这些载荷主要由波频载荷引起，所以可以采用线性频域方法计算得到。图 A.5.2 (6) 是典型张力腿平台关键水动力结构载荷 RAO。但是需要注意，极端设计工况的结构载荷需要进行非线性修正（F-K 力、平台大尺度运动、非线性静水力、非线性筋腱张力等）。对于结构细节的疲劳计算可以采用线性频域方法和谱疲劳分析方法结合进行。



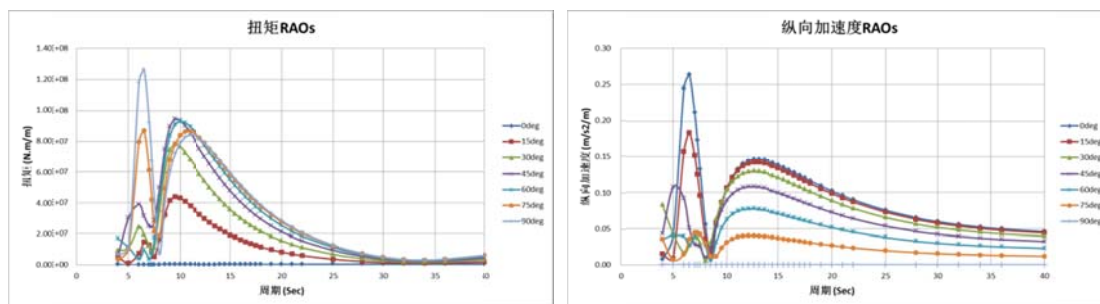


图 A.5.2 (6) 典型张力腿平台结构关键载荷 RAO

(10) 水动压力

对于结构极端响应和疲劳响应计算，局部水动压力载荷应合理地传递至结构有限元模型，同时与张力腿平台惯性力、静水回复力和筋腱张力保持平衡。在计算结构极端响应时，湿表面水动压力可根据需要进行相应的非线性修正，考虑 F-K 力，非线性静水力、自由液面动态变化、平台大尺度运动、非线性筋腱张力的影响。总之，必须保证结构有限元模型受力平衡。

附录 B 张力腿平台结构强度分析参考方法

第 1 节 概述

本附录主要针对张力腿平台以下几种强度分析给出指导意见：

- (1) 张力腿平台在位条件下整体强度分析；
- (2) 张力腿平台在位条件下局部强度分析，其中局部强度主要关注立柱与浮箱连接节点 (Node) 结构、立柱顶部及立柱与上部组块之间的甲板对接短柱结构以及筋腱抱紧器结构等；
- (3) 张力腿平台浮箱腹板框架和立柱环形框架结构的强度分析；
- (4) 张力腿平台疲劳分析，包括整体结构疲劳分析及局部结构详细疲劳分析。

第 2 节 张力腿平台整体结构强度分析

B.2.1 分析目的

整体强度分析的目的在于验证平台在在位条件下是否具有足够的整体屈服及屈曲强度、识别需要进行详细局部分析的工况和位置，并为局部分析提供边界条件。

B.2.2 分析方法

在张力腿平台整体强度计算中需要建立整体有限元模型，并按照重量控制数据进行质量调平。根据整体有限元模型提取的质量矩阵结合水动力模型进行水动力计算，获得设计波，并将波浪载荷加载到有限元模型下浮体外壳进行有限元计算。根据有限元计算结果校核结构的屈服强度及屈曲强度。整体强度计算的分析流程如图 B.2.2 所示。

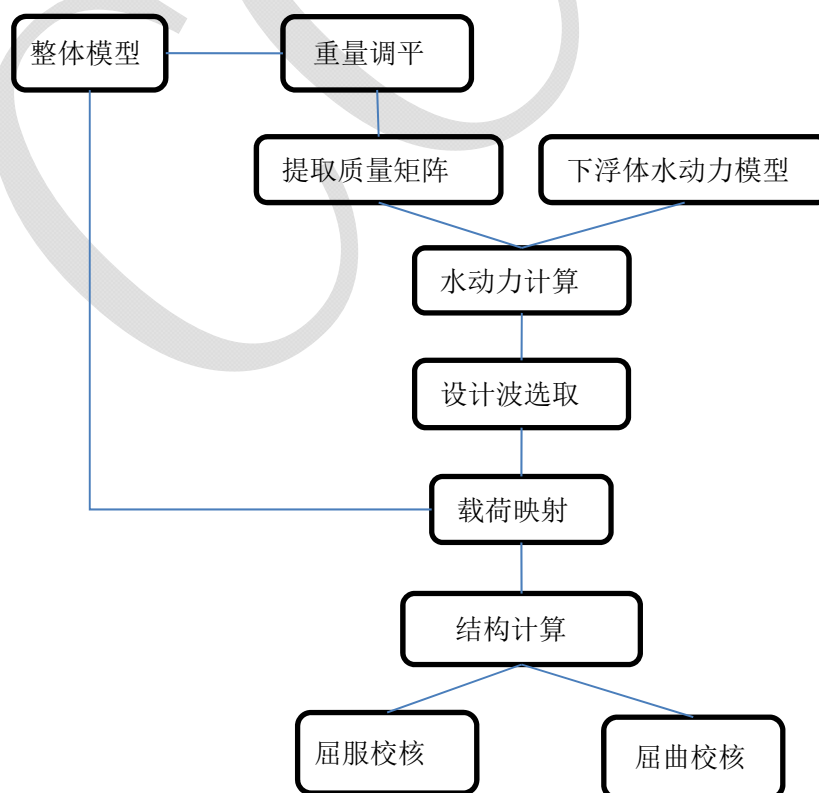


图 B.2.2 整体强度分析流程图

B.2.3 计算工况

整体结构分析考虑三种载荷工况：一年一遇的设计作业工况、百年一遇的设计环境工况以及千年一遇的设计自存工况。每种工况还需要考虑不同的设计波产生的波浪载荷。

B.2.4 计算载荷

(1) 静载荷

整体强度计算中的静载荷包括：

- ① 重力载荷；
- ② 静水压力；
- ③ 立管预张力；
- ④ 张力筋腱预张力；
- ⑤ 偏移和因偏移引起的垂直下沉产生的影响；
- ⑥ 风载荷。

重力载荷包括下浮体和组块的固定载荷和功能载荷。静水压力为依据设计吃水施加于下浮体外壳的线性外压。设计吃水包含平均吃水、最高天文潮与偏移和下沉导致的吃水变化。偏移和下沉导致的静水压力的增加通过张力筋腱轴向力的增加来平衡。

立管和张力筋腱预张力由整体性能计算获得。立管和张力筋腱由于张力腿平台运动产生的动力影响通过增加一定的额外载荷来体现。对立管，在立管与组块连接位置增加等同于立管干重的节点力。对张力筋腱，在张力筋腱与下浮体连接位置增加等同于 1/3 筋腱干重的节点力。

风载荷的计算参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》第 2 篇第 3 章第 4 节 3.4.2 确定。

(2) 波浪载荷

整体强度计算中波浪载荷包括：

- ① 波浪压力；
- ② 惯性载荷；
- ③ 淹没力。

波浪压力施加于结构湿表面。波浪运动导致的惯性载荷通过结构六自由度的加速度施加。淹没力考虑的是非线性波浪爬高的影响，每根立柱上的淹没力大小约为该立柱总的波浪力的 10-12%。淹没力可以以节点力的形式施加于立柱水线面位置。

B.2.5 有限元模型

张力腿平台下浮体壳结构、隔离舱壁、立柱水平板以及立柱和浮箱的内部框架腹板等皆采用壳单元模拟。所有加强筋及框架面板等采用梁单元模拟。下浮体和上部组块中的集中质量采用质量单元考虑。

组块甲板采用壳单元模拟，桁架结构、梁、加强筋等采用梁单元模拟。

在整体强度分析中张力筋腱等效为弹簧单元提供约束条件。

有限元模型应采用适当的单元大小以满足计算精度的要求。在关键位置，应进行一定的细化。

B.2.6 约束条件

将张力筋腱在连接位置模拟为沿着 X、Y、Z 三个方向的单向弹簧。弹簧单元的自由端约束 UX、UY、UZ 三个方向的平动。弹簧刚度按下式计算：

$$K_Z = EA/L$$

$$K_X = K_Y = T/L$$

式中：

K_Z ——轴向刚度

K_X 、 K_Y ——水平刚度

A——张力筋腱最小横截面积
L——张力筋腱的长度
T——张力筋腱的预张力

B.2.7 校核衡准

张力腿平台整体强度计算中以 von Mises 等效应力、正应力及剪应力作为屈服强度校核应力。屈服及屈曲校核的安全系数见本指南第 4 章表 4.7.2。

第 3 节 张力腿平台局部结构强度分析

B.3.1 分析目的

张力腿平台关键连接部位，如立柱与浮箱连接节点结构、立柱顶部与上部组块对接短柱结构、张力筋腱抱紧器等都需要进行局部强度计算，以确保这些关键部位具有足够的结构强度。另外，在整体强度分析中筛选出的关键结构位置也需要进行局部强度计算。

B.3.2 计算载荷

局部分析中采用的载荷一般与整体结构计算中该区域施加的计算载荷一致。但立柱顶部与上部组块甲板对接短柱和张力筋腱抱紧器分别受到组块和张力筋腱传递的载荷，局部强度计算中载荷的施加应注意以下几点：

(1) 立柱顶部与上部组块甲板对接短柱结构局部强度计算中，结构承受的载荷除了自身的重力，主要为上部组块传递下来的力和力矩。可在对接短柱顶部中间位置建立独立点，独立点与对接短柱顶部节点进行多点约束，将上部组块传递的力和力矩施加在独立点上。

(2) 张力筋腱抱紧器局部结构强度计算中，结构承受的载荷除了自身的重力外，主要为张力筋腱产生的张力。每个立柱一般连接两个或两个以上的张力筋腱，因此在张力筋腱抱紧器局部结构强度计算中除了考虑一年一遇的设计作业工况、百年一遇的设计环境工况以及千年一遇的设计自存工况三种工况外，还需要考虑各工况下筋腱完整、筋腱屈服、筋腱移除的情况。筋腱张力以及角度大小可以通过平台的性能分析获得。

B.3.3 有限元模型

局部分析的有限元模型除满足 B.2.5 的建模要求外，对于关键区域的梁以及加强筋也需要采用壳单元模拟，同时需要进行合理的细化。

B.3.4 约束条件

提取局部模型截取边界在整体强度分析中的位移作为局部模型截取边界处的约束条件。

B.3.4 校核标准

局部结构屈服及屈曲校核标准按照 B.2.7 执行。

第 4 节 立柱及浮箱框架强度分析

B.4.1 分析目的

分析目的是验证立柱及浮箱框架在设计工况下是否具有足够的屈服及屈曲强度。

B.4.2 计算工况

分析考虑三个基本工况：静水试验工况，设计操作工况（一年一遇）和极端工况（百年一遇）。各工况的压载根据平台的设计压头选取。具体的载荷施加如下：

(1) 立柱：静水试验工况施加舱室内压；操作工况和极端工况皆施加外压，并考虑不同舱室进水的组合；

(2) 浮箱：静水试验工况施加舱室内压；操作工况和极端工况施加外压。

B.4.3 有限元模型

(1) 立柱有限元模型包括结构外壳、内壳，垂向水密舱壁以及至少三个完整的水平框架。提取中间水平框架的计算结果进行强度校核。所有壳、板以及加强筋皆采用壳单元模拟。网格需进行合理细化。框架腹板在宽度方向至少包含 4 个单元，加强筋腹板方向至少包含 3 个单元。

(2) 浮箱有限元模型包括结构外壳以及至少三个内部腹板框架。提取中间腹板框架计算结果进行强度校核。所有壳、板以及加强筋皆采用壳单元模拟。网格需进行合理细化。框架腹板在宽度方向至少包含 4 个单元，加强筋腹板方向至少包含 3 个单元。

B.4.4 约束条件

约束结构两端节点的平动自由度。

B.4.5 校核标准

屈服强度安全系数取 1.43，屈曲校核的许用利用系数为 0.69。

第 5 节 张力腿平台疲劳强度分析

B.5.1 分析目的

分析目的是评估张力腿平台的整体疲劳性能并校核整体疲劳分析筛选出的关键区域的疲劳强度。

B.5.2 分析方法

张力腿平台疲劳计算通常采用谱疲劳分析方法。详细分析流程参见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》第 6 章。

B.5.3 有限元模型

(1) 整体谱疲劳分析中有限元模型与整体强度分析基本一致，但是在飞溅区扣除一半的腐蚀余量。

(2) 关键区域的有限元模型需要进行细化以计算热点应力。细化区域应保证热点应力不受位移边界条件和力的边界条件的影响，细化有限元模型边缘应有主要支撑，如桁材、舱壁、肋板等。热点位置网格为长宽比接近 1.0 的 $t \times t$ 网格， t 为板厚，细化网格区域的骨材同样采用壳单元模拟。细化网格区域应保证热点位置向外所有方向的延伸范围不小于 $10t$ ，且过渡区域的网格应保证平稳过渡。若细化区域处于飞溅区，应考虑一半的腐蚀余量。

B.5.4 约束条件

整体谱疲劳分析模型的约束与整体强度分析模型约束一致，参照 B.2.6。局部细化模型边界可在整体模型中提取边界位移进行约束。

B.5.5 S-N 曲线

谱疲劳计算基于 S-N 曲线进行，S-N 曲线的选取参照 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》第 2 章。

B.5.6 安全系数

疲劳安全系数选取参照本指南表 4.7.6 和表 4.8.5。

B.5.7 校核衡准

疲劳失效准则可以基于疲劳损伤或者疲劳寿命。当基于疲劳损伤时，计算点的疲劳强度应满足：

$$D \leq \frac{1.0}{S_{fg}}$$

式中:

D ——疲劳损伤度;

S_{fg} ——疲劳强度安全系数。

当基于疲劳寿命时, 所计算点的疲劳强度应满足:

$$T_{fg} \geq T_D \cdot S_{fg}$$

式中:

T_{fg} ——计算得到的疲劳寿命;

T_D ——结构设计寿命。

CS

附录 C 名词中英文对照表

Accidental Load	偶然载荷	MOSES TLP	摩西式张力腿平台
Air Gap	气隙	Offset	(平台) 偏移
API	美国石油协会	Operating Condition	作业工况
Ballast Compensation	压载补偿	Operator	作业者
Bilge System	舱底系统	Outfitting	舾装
Calm Condition	平静环境	Pitch	纵摇
CCS	中国船级社	Pontoon	浮箱
Column	立柱	Preservice	在位前
Column Stabilized Platform	柱稳式平台	Pretension	预张力
Corrosion Protection	防腐	Production Riser	生产立管
Coupling Effects	耦合效应	Pry-Squeeze Load	分离力/挤压载荷
Damage Condition	破损工况	Reduced Design Environment	折减设计环境
Deck	甲板	Return Period	重现期
Deck Post (Mating Post)	甲板对接短柱	Ringing	鸣振
Design Environment Condition (DEC)	设计环境条件	Riser	立管
Design Operating Condition (DOC)	设计作业条件	Riser Porch	立管抱紧器
Drilling Riser	钻井立管	Roll	横摇
Dry Transportation	干拖	Seastar TLP	海星式张力腿平台
ETLP, Extended TLP	延伸式张力腿平台	Setdown	因偏移引起的垂直下沉
Extreme Condition	极端工况	Set up	(土壤) 固结
Factor of Safety	安全系数	Slow Drift Force	慢漂力
Flex Element	挠性单元	Springing	弹振
Foundation	(海底) 基础	Stress Concentration Factor (SCF)	应力集中系数
Foundation Pile	桩基	Surge	纵荡
Fracture Mechanics	断裂力学	Survival Condition	自存工况
Free Standing	自由站立	Sway	横荡
Free Surface Correction	自由液面修正	Tendon	(张力) 筋腱
GM	最小初稳性高	Tendon Bottom Connector	筋腱底部连接器
Heave	垂荡	Tendon Flooded	张力筋腱进水
Helideck	直升机甲板	Tension Leg Platform (TLP)	张力腿平台
High Frequency	高频	Tendon Leg System	张力腿系统
Hull	下浮体	Tendon Pile	筋腱管子
Hull Compartment Damage	下浮体损坏	Tendon Porch	筋腱抱紧器
Hydrostatic Collapse	静水压溃	Tendon Removal	筋腱移除
IMO	国际海事组织	Tendon Top Connector	筋腱顶部连接器
Incline Test	倾斜试验	Topsides	上部组块
Inplace	在位	Top Tension Riser (TTR)	顶张紧式立管
Intact Condition	完整工况	Vortex Induced Vibration	涡激振动
Interference	干涉	Waterline	水线
Load Out	装船	Watertight	水密
Lightship	空船重量	Wave Crest	波峰
Low Frequency	低频	Wave Frequency	波频
Marine Growth	海生物	Wave Slamming	波浪砰击
Marine Operation Manual	操作手册	Weathertight	风雨密
Marine System	轮机管系	Wet Tow	湿拖
Mating post	对接短柱	Yaw	艏摇

参考文献

- [1] 国际海事组织,《海上移动式钻井平台构造和设备规则》(2009)。
- [2] 国际海事组织,《防污公约》(2011 综合文本)。
- [3] 国际海事组织,《国际海上人命安全公约》(2009 综合文本)。
- [4] 中国船级社,《海上浮式装置入级规范》(2014)。
- [5] 中国船级社,《海上移动平台入级规范》(2016)。
- [6] 中国船级社,《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》(2013)。
- [7] 中国船级社,《浅海固定平台建造与检验规范》(2004)。
- [8] 中国船级社,《钢质海船入级规范》(2015)。
- [9] American Petroleum Institute, API RP 2T Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms, Third Edition, July 2010.
- [10] American Petroleum Institute, API RP 2A-WSD Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design, 22nd Edition, November 2014.
- [11] American Petroleum Institute, API Bulletin 2U, Bulletin on Stability Design of Cylindrical Shells, 3rd Edition, June 2004.
- [12] American Petroleum Institute, API Bulletin 2V, Design of Flat Plate Structures, 3rd Edition, June 2004.
- [13] American Petroleum Institute, API RP 14C, Recommended Practice for Analysis, Design, Installation, and Testing of Basic Surface Safety Systems for offshore Production Platforms.
- [14] American Petroleum Institute, API RP 14G, Recommended Practice for Fire Prevention and Control on Fixed Open-type Offshore Production Platforms.
- [15] American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M:2010, Structural Welding Code—Steel.
- [16] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings. 2005
- [17] SY/T 10033, 《海上生产平台基本上部设施安全系统的分析、设计、安装和测试的推荐作法》。
- [18] SY/T10034, 《开敞式海上生产平台防火与消防的推荐作法》。