
指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD 09-2014



中国船级社

海上固定平台振动检测与 结构安全评估指南 2014

生效日期：2014年9月1日

北京

目 录

第 1 章 通 则.....	1
第 1 节 适用范围.....	1
第 2 节 目 的.....	1
第 3 节 术语及定义.....	1
第 4 节 评估依据.....	2
第 5 节 安全评估的流程.....	2
第 6 节 其 它.....	5
第 2 章 基础数据.....	6
第 1 节 一般规定.....	6
第 2 节 图纸和资料.....	6
第 3 章 平台结构重要性与安全分级.....	8
第 1 节 一般规定.....	8
第 2 节 结构重要性分类.....	8
第 3 节 平台结构安全分级.....	9
第 4 章 评估环境条件与荷载标准.....	10
第 1 节 一般规定.....	10
第 2 节 极值环境要素概率模型更新.....	10
第 3 节 评估荷载标准.....	11
第 5 章 平台结构检测与损伤识别.....	13
第 1 节 一般规定.....	13
第 2 节 平台结构振动检测与损伤识别.....	13
第 3 节 结构的局部定量检测.....	15
第 4 节 常规结构检测.....	15
第 5 节 桩基形位测量与桩基弱化.....	16
第 6 节 海生物附着厚度测量.....	16
第 6 章 结构模拟.....	17
第 1 节 一般规定.....	17
第 2 节 总体坐标系.....	17
第 3 节 单元类型.....	17
第 4 节 在役结构有限元建模.....	17
第 5 节 桩土相互作用.....	18
第 7 章 结构确定性安全分析评估.....	19
第 1 节 一般规定.....	19
第 2 节 结构构件确定性安全评估.....	19
第 3 节 结构整体确定性安全评估.....	20
第 8 章 结构可靠性安全分析评估.....	22
第 1 节 一般规定.....	22
第 2 节 结构构件可靠性安全评估.....	22
第 3 节 结构整体可靠性安全评估.....	23
第 9 章 平台结构构件疲劳分析与寿命预测.....	25
第 1 节 一般规定.....	25
第 2 节 构件确定性疲劳分析.....	25
第 3 节 构件可靠性疲劳分析.....	25
附录 A 指南重要理论、方法的注释.....	28
附录 B 平台结构维修决策与建议.....	42

第1章 通则

第1节 适用范围

1.1.1 本指南适用于海上固定平台的振动检测与结构安全评估。

1.1.2 振动检测适用范围

1.1.2.1 平台质量和刚度改变导致结构安全状况改变的海上固定平台。平台质量改变起因于平台用途的改变，如设备更换、设备调整等；平台刚度改变起因于平台构件性能的改变，如构件出现裂纹、腐蚀损伤等。

1.1.3 结构安全评估适用范围

1.1.3.1 平台在使用过程中，受到环境侵蚀、疲劳、腐蚀、碰撞的影响，导致结构退化、承载力降低，因此平台在寿命期内需要进行安全评估以确定其适用性。当平台出现下列情况时应应对平台进行安全评估：

- (1) 人员或设备增加或者失效后果更为严重，导致平台的重要性分类升高；
- (2) 设备增加导致作用在平台上的永久荷载、可变荷载增加超过 10%；
- (3) 资料证明气候变化，导致环境条件更加恶劣；
- (4) 基础改变，如大量冲刷或下沉；
- (5) 甲板高程不足，如原设计标准或新标准定义的波浪可以冲击到甲板，并且设计时未考虑其影响；
- (6) 在检验中发现结构有明显的损伤或退化，导致平台承载能力明显下降。

1.1.3.2 由于实际生产的需要，平台在达到设计寿命后需要进行安全评估以确定其现状是否满足继续生产作业的要求；另外有些平台如果被迁移到一个新的地点继续使用，是否能满足新环境条件下的继续生产作业的要求。

1.1.3.3 平台的安全评估是为业主提供的技术支持服务。它是根据对平台的设计、长期运营维护资料调查、现场详细调查、现场检测及分析计算等对平台实际安全进行安全评估的一项独立和完整的证明。

第2节 目的

1.2.1 结构振动检测的目的是获得结构的动力特性参数（频率、阻尼比、振型），并用于结构的健康检测与状态评估。

1.2.2 平台结构安全评估的目的是为业主提供一个极端条件下的平台实际安全技术文件和声明，以表明平台是否符合本指南确定的技术指标，可供业主在作业时提供有关方使用。

1.2.3 安全评估结果也为平台的合理使用而进行的修理和保养提供依据。

第3节 术语及定义

1.3.1 术语及定义

海上固定平台：一种借助于桩、扩展基础或用其他方法支撑于海底，使上部露出水面，为了预定目的能较长时间内保持不动的平台。

结构安全评估：利用结构现有资料，对平台结构进行计算分析评估，鉴别在结构安全方面的薄弱环节和隐患，并对结构局部和整体的安全性做出系统评价的分析方法。

JC 方法：国际“结构安全度联合委员会”（JCSS）推荐使用计算结构可靠度的一种改进一次二阶矩法。

可靠指标：度量结构可靠性的一种数量指标，它是标准正态分布反函数在可靠概率处的函数值，并与失效概率在数值上有一一对应的关系。

振动检测: 利用平台在激振力作用下发生振动现象, 通过对结构振动状态的振动信息进行采集, 获得被测结构动态性能(固有频率、阻尼、响应、模态等)信息, 确定结构动力性能的一种检测手段。

损伤识别: 根据结构模态参数与物理参数的对应关系, 应用结构振动测试模态参数与基准模型模态参数变化特征判断结构损伤状况的方法。

应力比: 评估荷载作用下在役结构构件实际最大应力与构件的允许应力的比值。

第 4 节 评估依据

1.4.1 国家法规

《海上固定平台安全规则(2000)》

1.4.2 API 规范对平台安全评估一般要求

(1) API RP 2A-WSD (Recommended practice for planning, designing and construction fixed offshore platforms—Working Stress Design)。

(2) API RP 2A-LRFD(Recommended practice for planning, designing and construction fixed offshore platforms—Load and Resistance Factor Design)。

1.4.3 民用建筑可靠性鉴定标准对结构安全的要求

《民用建筑可靠性鉴定标准》

1.4.4 中国船级社规范

《浅海固定平台建造与检验规范(2004)》

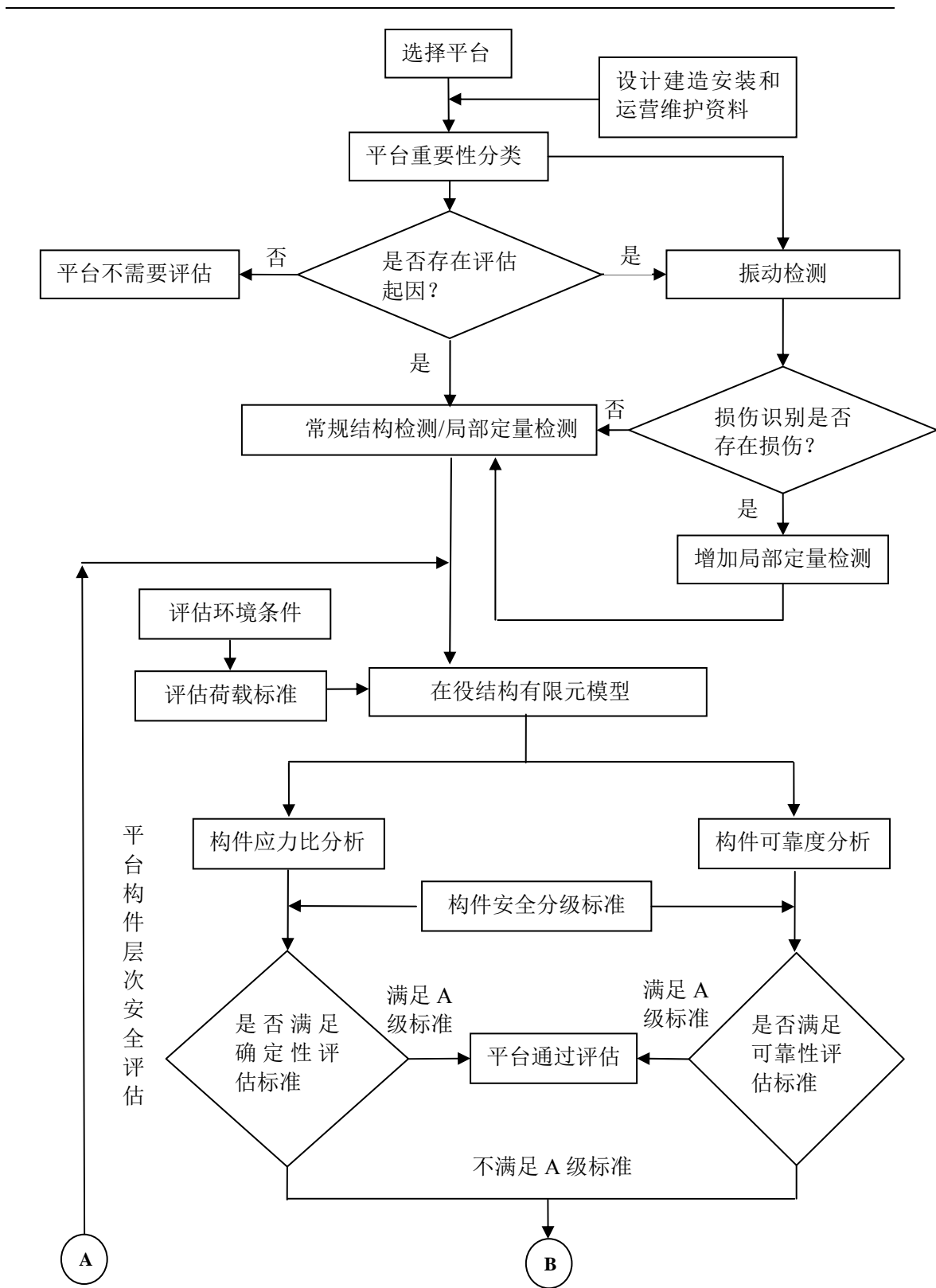
第 5 节 安全评估的流程

1.5.1 在役平台的安全评估的过程应分别考虑人命安全和失效后果对平台重要性进行分类, 对不同重要性分类的结构整体进行安全评估时应采用相应的安全标准。

1.5.2 平台的安全评估过程主要包括以下几个方面:

- (1) 平台重要性分类
- (2) 环境条件评估
- (3) 设计、建造、完工资料及检测、维护、维修及改造资料审核
- (4) 评估起因审核
- (5) 平台振动检测(如有时)
- (6) 损伤识别分析
- (7) 平台局部定量检测
- (8) 常规结构检验
- (9) 构件应力比分析
- (10) 结构极限强度分析
- (11) 构件可靠度分析
- (12) 结构体系可靠度分析
- (13) 缓解措施的考虑

以上几方面的逻辑关系如图 1.1 所示。



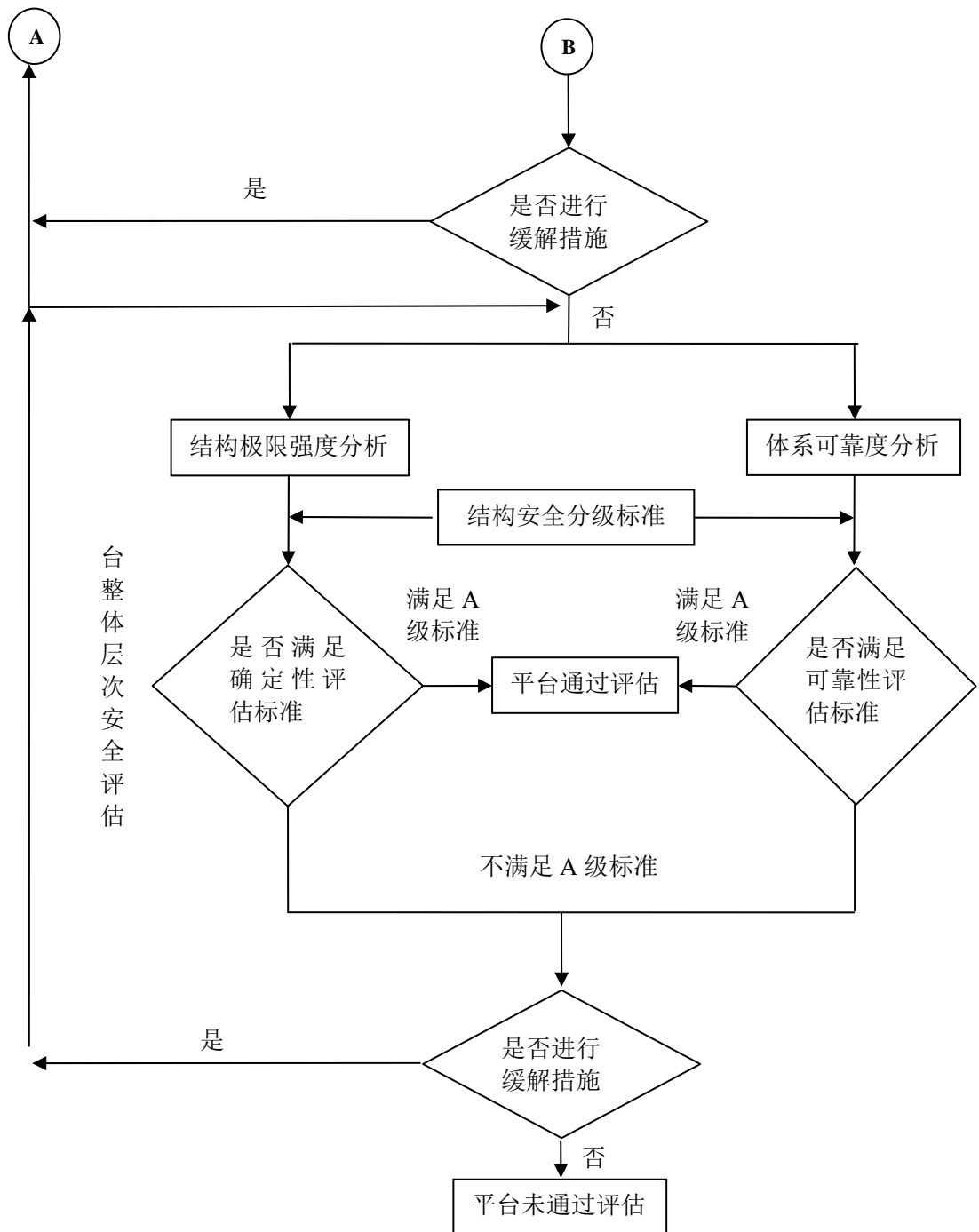


图 1.1 评估流程

1.5.3 根据平台振动检测与分析结果和平台安全要求，确定平台是否应进行详细检测，在此基础上进行构件层次的安全评估或结构整体层次的安全评估。

1.5.4 构件的破坏不一定导致结构的破坏。一般比较有效的方法是先构件层次的安全评估，而仅在需要时才进行结构整体层次安全评估。但是允许跳过构件层次安全评估，直接进行结构整体层次安全评估。

1.5.5 结构构件层次应力比分析和构件可靠度分析是构件层次安全评估的两个方面，一般应以确定性的应力比评估结果为主，另一种评估方法评估结果作为参考。

1.5.6 结构整体极限强度分析和结构体系可靠度分析是结构整体层次安全评估的两个方面，一般以确定性结构极限强度评估结果为主，另一种评估方法作为参考。

1.5.7 平台在进行构件层次安全评估和结构整体层次安全评估时，如不能满足相应安全标准，可进行维修决策分析，根据维修决策分析结果决定是否采取缓解措施，直到平台满足相应的要求，平台的维修决策及建议可参考附录 B。

第 6 节 其 它

1.6.1 钢质固定平台结构安全评估，除应符合本指南的要求之外，尚应符合国家现行关于在役固定平台结构安全的强制性标准的规定。

1.6.2 检测数据的准确性、可靠性不能保证时，平台结构的安全评估结果不具有参考价值。

1.6.3 确定评估荷载概率模型的统计数据资料缺乏时，评估荷载取值应主要参考设计荷载取值。

第2章 基础数据

第1节 一般规定

2.1.1 对于平台的安全评估，首先应收集相关的图纸和资料，为评估结构模型建立和确定评估荷载提供基础数据。如发生图纸和资料的缺失，则需要实地测量，获得准确、可靠的数据，这些数据的测量对于评估结果的可靠性极为重要。

2.1.2 所需的图纸和资料主要包括平台三个阶段积累的资料：

(1) 平台结构初始详细资料，包括平台结构详细设计报告，海洋环境设计报告，结构设计、建造、完工图纸；

(2) 平台结构运维详细资料，包括平台结构检测、维护、维修加固资料，平台改造资料，平台功能调整导致平台设备变动产生的质量分布变化资料，平台结构使用过程环境和结构性能参数监测资料；

(3) 平台当前状态资料，结构和系统当前的、全面的调查，包括破损情况调查表，局部定量检测结果表，平台基础三维地形测量结果表。

第2节 图纸和资料

2.2.1 总体信息

- (1) 最初和当前的业主
- (2) 最初、运营过程、当前的平台用途和功能
- (3) 位置、水深和方位
- (4) 平台型式及其他特定信息、操作等级
- (5) 其他的具体场地资料、人员配备等

2.2.2 原始设计资料

- (1) 设计承包人、设计日期。
- (2) 设计图纸、材料说明
- (3) 设计标准
- (4) 环境标准——风、海浪、海流、冰等
- (5) 甲板的允许高程
- (6) 操作标准——甲板的荷载、设备布置
- (7) 土壤资料
- (8) 桩和隔水套管的尺度和设计贯入深度
- (9) 附属构件——清单和布置

2.2.3 建造完工资料

- (1) 建造、安装承包人和安装日期
- (2) 竣工图纸
- (3) 制造、焊接和建造规格书
- (4) 材料跟踪记录
- (5) 桩和隔水套管的打入记录等。
- (6) 桩灌浆记录(如适用)

2.2.4 平台使用历史资料

- (1) 环境荷载记录——台风、风暴等
- (2) 操作荷载记录——碰撞和偶然荷载
- (3) 过去环境作用效应下的表现情况
- (4) 平台振动检测记录
- (5) 检验和维修记录
- (6) 修理情况记录——图纸、日期等

(7) 改造情况记录——图纸、日期等

2.2.5 当前条件资料

- (1) 所有结构的实际尺寸、位置、高程
- (2) 所有甲板的荷载和设备布置
- (3) 产量和储备物清单
- (4) 平台基于振动检测损伤识别分析报告
- (5) 常规结构检验报告
- (5) 水下海生物附着情况
- (6) 平台腐蚀调查和探伤测厚报告
- (7) 平台所在海域积累的环境数据
- (8) 平台基础三维地形测量报告

第3章 平台结构重要性与安全分级

第1节 一般规定

3.1.1 平台结构的重要性分类的目的是为了平台结构安全评估时区别考虑，平台结构的重要性等级越高，其安全水平越高，反之亦然。

3.1.2 平台结构的重要性分类应考虑人命安全和失效后果。人命安全等级越高，结构失效造成人员伤亡人数越多，平台结构重要性等级越高，反之亦然；失效后果等级越高，结构失效造成经济损伤越多，平台结构重要性等级越高，反之亦然。

3.1.3 平台结构安全分级的目的是为了细化在役平台结构的安全状况，获得平台结构安全水平更多信息，为维修决策提供参考。

3.1.4 平台结构安全分级的依据主要平台结构要求的安全水平及其对应的结构损伤程度。

3.1.5 平台结构安全分级分为结构构件安全分级标准和结构整体安全分级标准两个层次，构件又分按应力比参数和构件可靠指标参数划分两个方面；结构整体分按储备强度系数和体系可靠指标参数划分两个方面。

第2节 结构重要性分类

3.2.1 平台可以根据不同的人命安全和失效后果对结构的重要性进行分类，对不同重要性的在役平台进行安全评估，结构整体安全评估时采用的安全指标参数与之相一致。

3.2.2 平台主要通过考虑人命安全和失效后果来确定等级。人命安全按预计的最可能环境事件，即有人在平台时预期发生的情况来考虑。失效后果分析应包括预期的业主的损失(平台和设备的维修和更换、生产损失、环境清理)、其他作业者的损失(经由主管道引起的生产损失)、工业界和政府的损失。

3.2.3 人命安全的分级为：

R-1=有人居住——不撤离

R-2=有人居住——撤离

R-3=无人居住

确定人命安全的适当的等级应基于下述规定：

R-1 有人居住——不撤离

有人居住——不撤离系统指平台上一直有人居住并在上生活，在设计环境事件发生之前，不准备撤离，或者撤离是不实际的。

R-2 有人居住——撤离

有人居住——撤离系统指除了预报的设计环境事件期间外，通常都有人居住的平台。只要设计环境事件前已有撤离计划并且有充足时间可安全地将全部人员从平台上撤离，分级时可将平台归为有人居住——撤离一类。

R-3 无人居住

无人居住系指平台上不常有人，或者是既不属于有人居住——不撤离、也不属于有人居住——撤离的平台。某些情况下，偶然有人居住的平台可划为无人居住平台的范围。

3.2.5 结构失效后果的分级为：

L-1=严重失效后果

L-2=中等失效后果

L-3=轻微失效后果

结构失效后果一般应包括对业主、其他作业者和工业界预期损失的考虑。下述规定可作为确定失效后果相应等级的基本原则：

L-1 严重后果

严重失效后果等级是指重要的平台和/或那些一旦失效可能出现油、气泄漏的平台。此外，还包括那些设计事件发生前不准备或不可能中断油、气生产的平台。有重要输油管线和间歇输油储油设施的平台也应视为严重后果级别。

L-2 中等后果

中等失效后果等级是指设计事件发生期间停产的平台。所有平台失效时会自流的油井必须装有功能齐全的水下安全阀，水下安全阀应按照适用的中华人民共和国石油天然气行业标准制造和试验。原油只限于在处理储罐和缓冲罐中储存。

L-3 轻微后果

轻微失效后果等级是指设计事件时停产的小平台。所有在平台一旦失效时能自喷的油井必须装有功能齐全的井下安全阀，井下安全阀应按照适用的中华人民共和国石油天然气行业标准制造和试验。这些平台上可装有生产分离设施和小容量的内部管线，原油只限于在处理储罐中储存。

3.2.6 平台结构重要性分类

平台结构重要性主要根据人命安全和失效后果分为 I、II 和 III 三类，分类标准应按表 3.1 的规定执行。

表 3.1 平台结构重要性分类标准

失效后果 人命安全	L-1	L-2	L-3
R-3	I	II	III
R-2	I	II	II
R-1	I	I	I

第 3 节 平台结构安全分级

3.3.1 平台结构构件安全分级标准应按表 3.2 的规定执行。

表 3.2 结构构件安全分级标准

安全等级	结构构件安全要求
A 级	构件安全性符合安全标准 A 级的要求，具有足够的承载能力，构件安全，不必采取措施
B 级	构件安全性略低于符合安全标准对 A 级的要求，尚不显著影响承载能力，应引起重视
C 级	构件安全性不符合安全标准对 A 级的要求，显著影响承载能力，应采取
D 级	构件安全性极不符合安全标准对 A 级的要求，已严重影响承载能力，必须及时或立即采取措施。

3.3.2 平台结构整体安全分级标准应按表 3.3 的规定执行。

表 3.3 结构整体安全分级标准

安全等级	结构整体安全要求
A 级	平台结构整体安全符合安全标准对 A 级的要求，不影响整体承载，可能有个别构件应采取
B 级	平台结构整体安全性略低于安全标准对 A 级的要求，尚不显著影响整体承载，可能有极少数构件应采取
C 级	平台结构整体安全性不符合安全标准对 A 级的要求，显著影响整体承载，应采取
D 级	平台结构整体安全性极不符合安全标准对 A 级的要求，严重影响整体承载，必须立即

第 4 章 评估环境条件与荷载标准

第 1 节 一般规定

4.1.1 平台的安全评估应考虑与特定海域和操作条件相关的各种环境条件，主要包括：风、波浪、潮汐、海流、冰、地震等。应对设计获得环境条件数据和使用过程中积累的现场观测数据进行统计分析，以得到评估环境条件的准确描述。

4.1.2 对平台进行安全评估时，在条件许可的情况下，应根据最新海况统计资料对设计环境要素概率模型进行更新，根据环境要素更新概率模型对评估环境条件进行重新确定，包括操作条件和极端风暴条件下的评估环境参数和概率模型等。如无相关资料，应按原始设计的环境资料进行评估。

4.1.3 环境荷载与环境要素之间存在确定关系(可参考 API 等规范规定荷载计算公式)，确定环境要素极值概率模型和评估代表值的设计基准期和设计重现期与荷载相应的设计基准期和设计重现期具有一致性。

第 2 节 极值环境要素概率模型更新

4.2.1 环境要素

4.2.1.1 风

对水面以上的平台结构和设备均需要考虑风力的作用，计算风荷载的环境要素为风速，风速可分为两种：

- (1) 阵风风速，一般指平均持续时间远小于 1 分钟的风速，用于单个构件的设计；
- (2) 持续风速，一般指平均持续时间大于 1 分钟的风速，用于计算平台风荷载。

4.2.1.2 波浪

波浪荷载是海上平台所承受的主要环境荷载之一，计算波浪荷载的环境要素常用有义波高和跨零周期。对于不同的设计海况，分别有不同的考虑。

对正常海况，有：

- (1) 每月或每季度内，特定波向的不同波浪海况的出现概率和平均持续时间；
- (2) 和上述海况同时出现的风速、潮汐和海流

对极端海况，应按评估重现期确定特定波向的评估极端波高，另外还需确定如下资料：

- (1) 与极端波高有关的波浪周期的可能范围和分布
- (2) 在产生极端波高的海况中，其他波高的分布、最大波峰高程和波谱
- (3) 与产生极端波浪的海况同时出现的风速、潮汐和海流

4.2.1.3 潮汐

(1) 在平台的设计中潮汐是重要的考虑因素，潮汐可以分为：天文潮、风成潮、压差潮。后两者常组合在一起，称风暴涌(Storm surge)，三者组合称为风暴潮，代表极端水位。日天文潮高程的变化决定了靠船平台、防撞构件、飞溅区以及海生物区上限的高程。

(2) 应按评估重现期确定平台所处海域风暴潮的数值，作为平台高程的安全评估依据之一。

(3) 潮汐影响到水深，而安全评估中水深参数的确定跟平台操作条件有关。以平均海平面作为基准面，对于正常环境条件，一般参照最大天文潮水位；对于极端环境条件，一般参照极端水位。对于平台的动力分析和疲劳分析，水深一般直接参照平均海平面确定。

4.2.1.4 海流

(1) 海流对平台的作用体现在多个方面：除了作用在平台上的流力之外，考虑流对波浪的 Doppler 效应，将影响波浪的表现周期。

- (2) 流速一般按表层、中层和底层给出，也可以是沿水深的一个分布函数。

4.2.1.5 冰

若平台所处区域为可能结冰或可能出现流冰的区域，则进行安全评估时需要考虑冰力作用。为计算冰荷载，一般需给出冰的密度、厚度、抗压强度、弯曲强度等参数

4.2.1.6 地震

(1) 对处于有地震活动区域的海上平台进行安全评估,应考虑地震力。平台所处区域处于哪种地震活动级别,是根据以前的地震活动记录、出现概率和幅值而确定的。

(2) 对于地震活动区域,应用场地的专门研究确定使用的地震地面运动的强度和特征。地面运动的强度和特征的评价应考虑区域内的活动断层,断层的类型、每条断层可能产生的地震的最大量级、区域地震活动率、现场到可能的震源断层的距离、在这些断层和平台现场之间的地面运动的衰减以及现场土壤条件。

(3) 用于安全评估的地震动加速度取值根据 API 规定执行。

4.2.1.7 海底冲刷

(1) 冲刷是海流和波浪作用所引起的海底土的移动,在桩及桩群结构周围形成的陡坡冲刷槽或结构物周围出现较大范围的浅冲刷盆。

(2) 海底冲刷对桩的侧向和轴向性能及承载能力都会产生一定的影响。除了考虑冲刷深度的对平台桩基约束的影响,还应考虑长期环境荷载作用下引起地基土抗力弱化。

4.2.1.8 海生物

海生物将导致结构重量的增加,另外由于加大了构件的尺寸和粗糙度,将引起波浪力的增大,因此对海上平台进行安全评估,海生物的影响是必须要考虑的。在考虑海生物对结构安全影响时采用海生物附着厚度和相应粗糙度水动力参数进行考虑。

4.2.1.9 海水温度

海水温度对结构弹性模量有一定影响,在平台结构安全评估是可忽略其影响,但是在结构振动检测基础上进行结构损伤识别时应考虑其修正。每次振动检测期间应有海水温度的分时记录。

4.2.2 极值环境要素概率模型更新

4.2.2.1 确定性评估环境条件

构件确定性安全评估时,风、浪、流、冰评估环境条件参数代表值应根据评估环境条件参数年极值概率模型和评估重现期确定,其计算公式如下:

$$x_k = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{T_1}\right) \quad (4-1)$$

式中: x_k ——评估环境条件参数代表值;

$F^{-1}(x)$ ——年极值环境条件参数累积分布反函数;

T_1 ——评估重现期,一般取设计重现期。

4.2.2.2 可靠性评估环境条件

结构可靠性评估时,风、浪、流、冰环境条件参数概率模型应根据评估环境条件参数年极值概率模型和评估基准期确定;

$$F_{T_E}(x) = [F(x)]^{T_E} \quad (4-2)$$

式中: $F_{T_E}(x)$ ——评估基准期 T_E 内的环境条件参数极值概率模型;

$F(x)$ ——年极值环境条件参数累积分布反函数;

T_E ——评估基准期,一般取设计基准期。

4.2.3 极值环境要素概率模型更新

中国海域环境要素数据积累时间不长,其设计概率模型确定数据基本采用合理推算获得,平台使用过程中积累数据更真实的反应了环境要素随机特性,因此考虑现场数据更新设计极值要素概率模型将更合理的反应极值环境要素概率模型特性。在平台现场积累了可用环境要素数据的条件下,应考虑现场环境数据对设计极值环境要素概率模型的更新(可参考附录 A.4.2)。

第 3 节 评估荷载标准

4.3.1 荷载分类

(1) 固定荷载:包括平台结构的重量和在某个作业形式下不变化的任何永久设备和附属

结构的重量。

(2) 活荷载：指在平台使用期间作用在它上面的荷载，它可能在一种作业形式期间就发生变化，也可能从一种作业形式到另一种时发生变化。

(3) 环境荷载：包括风、浪、流、冰、地震等自然现象作用在平台上的荷载。

4.3.2 确定性评估荷载

固定荷载、活荷载应参考设计值并考虑到建造完工后的变化情况进行修正，地震荷载的评估取值与设计取值一致。

环境荷载可根据环境条件参数计算获得，评估荷载应根据评估环境条件参数确定，风、浪、流、冰等环境荷载计算可参考 API RP 2A-WSD 第 2 章相关规定。

4.3.3 可靠性评估荷载

荷载概率分布类型

- (1) 重力荷载服从正态分布。
- (2) 甲板活荷载服从正态分布。
- (3) 环境荷载服从极值 I 型分布。

设计荷载统计特征参数

- (1) 重力荷载的均值系数为 1.0 和变异系数为 0.0537。
- (2) 甲板活荷载的均值系数为 1.0 和变异系数为 0.14。
- (3) 中国海域环境荷载局部时段(年)极值统计特征参数应该根据相应海域环境要素长期观测资料统计确定，在资料缺乏时可参考已发表的相关统计结果。如有现场环境条件参数积累资料，应考虑现场环境条件参数计算荷载序列对相关统计极值荷载概率模型进行更新。

4.3.4 荷载组合原则

(1) 根据所选定的评价环境条件，对实际有可能同时作用于平台上的各种荷载，应按其最不利的情况进行组合，但地震荷载除外。每个平台构件都应根据在构件中产生最大应力的荷载条件，并考虑产生这个应力的荷载条件和容许应力进行设计。一般按照如下情况进行组合：

- ① 固定荷载和相应于平台正常操作的最大活荷载相组合的作业环境条件；
- ② 与固定荷载和相应于平台正常操作的最小活荷载相组合的作业环境条件；
- ③ 与固定荷载和相应于与极端条件相组合的最大活荷载组合的设计环境条件；
- ④ 与固定荷载和相应于与极端条件相组合的最小活荷载组合的设计环境条件。

(2) 对同一平台的不同评价项目(如结构的局部构件计算或总体计算等)或不同阶段(施工阶段或使用阶段)，应按实际可能出现的最不利情况进行荷载组合。在组合时，应考虑水位的影响。

(3) 可靠度分析时冰区海域考虑波浪工况和冰工况，非冰区海域仅考虑波浪工况。

第5章 平台结构检测与损伤识别

第1节 一般规定

5.1.1 平台应按照《海上固定平台安全规则》要求进行年度检验及定期检验，常规结构检验内容见5.4。

5.1.2 平台结构检测分平台结构振动检测、局部定量检测和桩基形位测量。振动检测的目的是获得结构的动力特性参数，进行结构模型修正和损伤识别，并根据损伤识别结果进行平台安全简单定量评估和制定平台局部定量检测计划；局部定量检测是测量确定损伤尺寸和位置，为在役结构建模提供依据，桩基形位测量是确定基础冲刷深度，为桩基弱化和更新结构边界条件约束提供依据。

5.1.3 平台结构振动检测应反映平台的整体健康状况，准确识别出结构的动力特性参数，并用于结构损伤状况的判别；结构振动检测结果是进行平台安全评估和平台局部定量检测计划制定的重要依据。

5.1.4 平台的局部定量检测应真实地反映平台结构的实际状况，平台结构的检测结果为建立反应平台结构当前状态的结构有限元模型提供重要依据，是获得可靠安全评估结果的重要条件。

第2节 平台结构振动检测与损伤识别

5.2.1 振动检测传感器的选型原则

平台振动检测传感器选择应结合传感器性能和传感器工作环境综合考虑，应遵循的选型原则包括：

(1) 性能参数可靠性原则

传感器正常工作时具有可靠、稳定的性能参数；

(2) 工程环境适应性原则

传感器在平台结构所处的环境温度、湿度等工作环境因素变化范围内的具有正常的工作性能；

5.2.2 振动检测传感器布置原则

考虑各传感器的特征、结构检测需要获得的信息以及施工可行程度，平台振动检测传感器布设总体原则为：

(1) 传感器最优布设原则

为了在含噪音的环境中能够利用尽可能少的传感器获取全面、精确的结构动力特性参数，应在结构的最优位置布置传感器。最优测点位置测得的信号应对结构模态参数的变化敏感，测试数据识别得到的结果应具有较好的可视性和鲁棒性。同时为了提高损伤识别的效果，可合理增加传感器的测点布置；

根据振动测试的目的，可以选择所有已经证实有效的传感器优化布置方法来确定最优的测点位置。

(2) 可操作性原则

传感器的布设工艺易于安装和拆卸，布设过程中不影响平台正常工作，具有简单、方便的可操作性；

(3) 不损伤结构原则

为了保证结构的完整性，传感器的布设工艺不能损伤结构；

(4) 重点区域检测原则

对收集的平台结构图纸资料和以前的检测资料进行分析，确定损伤最可能发生的位置或区域，有针对性地布置传感器。

5.2.3 结构激励方式选择

为了获得平台结构的振动响应，需要对平台结构进行激励，激励的方式主要有船拉激励和环境荷载激励。

(1) 平台现场振动测试, 应尽量利用大风引起的波浪荷载或冬季冰期流冰荷载对平台施加的环境荷载激励;

(2) 在不能利用环境荷载激励条件时可选择船舶拖拉激励或停靠撞击激励方式, 采用船舶拖拉激励或停靠撞击激励方案必须经业主同意, 不能影响平台正常使用, 不能使结构产生或恶化损伤, 作业过程须有安全防护条件。

5.2.4 振动检测数据采集与处理

(1) 采样长度即采样时间的长短, 信号采样要有足够的长度(单次采样长度宜不低于300s), 保证信号的完整, 同时保证有较好的频率分辨率, 超低频传感器最低频率宜小于0.1Hz;

(2) 采样方式采用等时间间隔方式, 即固定采样频率采样, 固定采样频率应满足采样定理;

(3) 多个测点的采样数据应保证其同步性, 减小同步误差, 以保证模态参数识别的准确性和精度;

(4) 根据采集信号特征, 采用合适的方法对测试信号进行滤波, 使噪声与有用信号分离, 抑制和消除噪声;

(5) 对采集信号进行常规检验, 检测数据是否存在不可能数据点、重复数据点、数据尖点和缺失数据点等异常数据, 验证采集数据的真实性;

(6) 对采集信号进行时域变换和频域变换, 根据数据的时域特性和频域特性, 验证采集数据的合理性。

5.2.5 平台结构模态参数识别

结构模态参数识别是指根据结构振动检测采集的振动响应数据来识别结构模态参数(频率、振型、阻尼比等)的过程, 模态参数识别方法主要包括频域模态参数识别方法和时域模态参数识别方法。

可以采用所有已经证实有效的模态参数识别方法进行结构模态参数的识别。

5.2.6 平台结构模型修正

基于结构动力特性变化的损伤识别方法需要一个基准模型, 该基准模型一般通过结构设计/完工图纸建立初始平台结构有限元模型, 根据未损伤结构现场振动响应测试识别结构动力特性修正初始平台结构有限元模型获得, 因此基准模型需真实的反应未损伤结构动力特性。

结构模型修正方法可采用所有已经证实有效的模型修正方法。

5.2.7 平台结构损伤识别

结构损伤将导致结构的刚度和阻尼发生改变, 从而与之相关的结构模态参数也会发生改变; 结构损伤识别就是通过结构的基准模型(或其衍生参数, 如模态应变能参数等)与平台结构现场振动测试响应识别的模态参数构建合适的损伤特征参数, 从而确定结构损伤的位置或区域。平台结构损伤识别具体流程见图 5.1。

损伤识别应遵循以下原则:

(1) 平台损伤识别方法应采用已证实有效的能反应平台结构特征和损伤敏感性的方法;

(2) 平台结构损伤识别结果以损伤位置表示, 并尽可能给出损伤的严重程度, 以指导详细定量检测计划的制定;

(3) 平台结构损伤识别分为损伤初判和损伤计算两个步骤; 当结构的前三阶频率没有显著变化时, 认为结构完整性没有明显变化, 完成结构损伤初判; 当结构前三阶频率有显著变化时, 依据原则(1)选取结构损伤识别方法进行结构损伤计算, 确定结构损伤程度和损伤位置。

(4) 建议采用模态应变能方法进行结构单元损伤识别, 当模态应变能指标大于 2 时认为结构单元发生损伤。

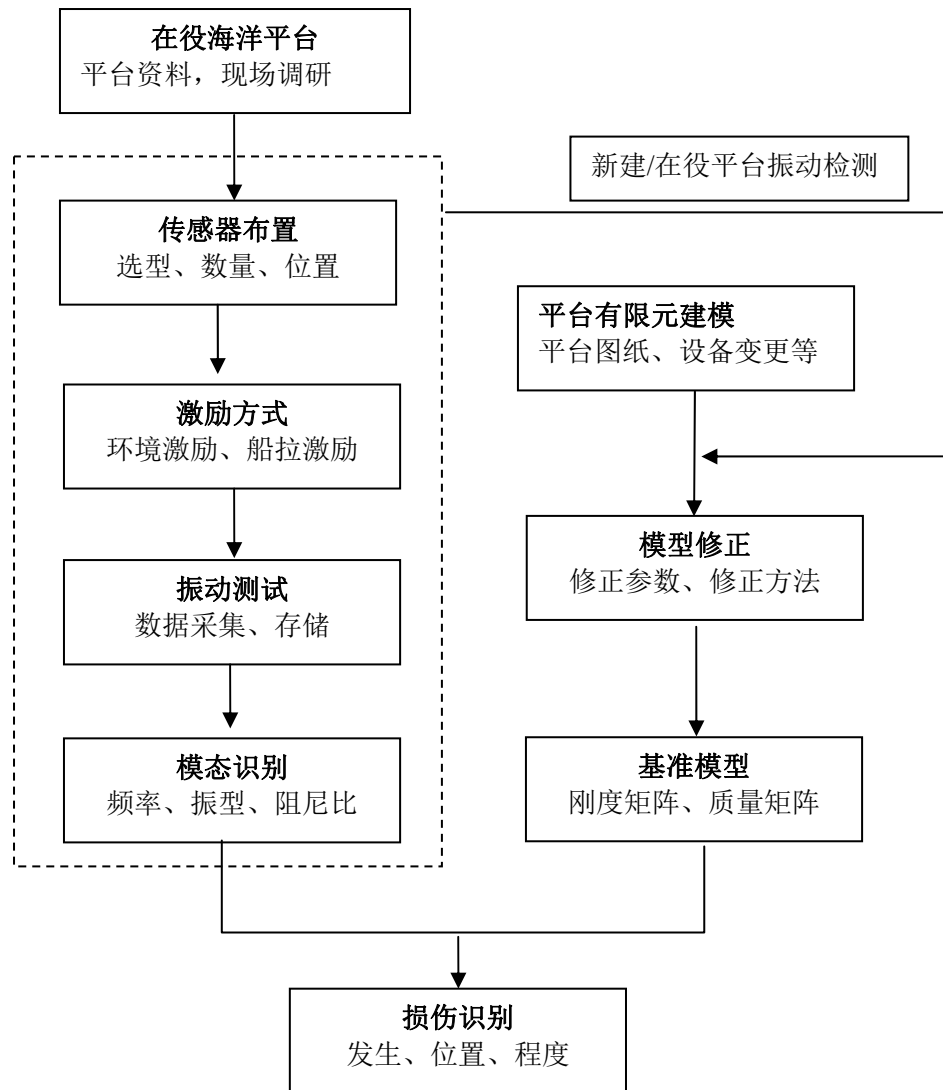


图 5.1 基于振动测试的结构损伤识别流程示意图

第 3 节 结构的局部定量检测

5.3.1 为保证局部定量检测结果精确性和可靠性，检测手段、方法具有足够的可靠性；检测方应具备国家相关规定的检测资质。

5.3.2 局部定量检测的重点应该是影响结构整体性能变化的腐蚀、裂纹、机械损坏(凹陷)、变形等损伤因素。对平台结构的主要构件/节点，特别是结构损伤识别可能损伤的区域增加特别检验。

5.3.4 对平台结构进行局部定量检测，应注意飞溅区内船舶或漂浮物对结构的碰撞引起的损坏、因腐蚀引起的损坏、重大改造的部位以及历次检验时所发现的损坏修理部位，特别是结构损伤识别可能损伤区域进行重点检查。

5.3.5 对平台结构的重要受力节点(包括水上、水下结构及飞溅区的节点)，尤其是高应力节点、容易引起应力集中的部位和低疲劳寿命节点，特别是结构损伤识别可能损伤节点进行无损检测。

第 4 节 常规结构检测

5.4.1 对平台结构进行全面地检验(包括直升机甲板结构)。特别应注意飞溅区内船舶或

漂浮物对结构的碰撞引起的损坏、因腐蚀引起的损坏、重大改造的部位以及历次检验时所发现的损坏修理部位。

5.4.2 检查甲板、通道、梯道、栏杆、梯口和升降口等的安全设施。

5.4.3 检查平台群的连接栈桥的结构及其保护栏杆。

5.4.4 水下结构检验应注意以下几点：

(1) 包括导管架、隔水套管、立管和立管卡以及靠船构件和登船平台等，采用水下录像或其它适宜的手段进行一般性的水下检验；

(2) 对某些有代表性的区域，例如高应力节点、高应力杆件区域、低疲劳寿命节点区域以及曾发生过损坏修理的区域，或曾做过改装、改造的区域以及飞溅区等进行重点检查，检验前对这些重点区域应进行表面清洁，主要检验有无明显的腐蚀、机械损坏和变形等；

(3) 在检验时还应注意在过去的检验中发现的异常区域。

(4) 检查平台结构的重要受力节点(包括水上、水下结构及飞溅区的节点)，尤其是高应力节点、容易引起应力集中的部位和低疲劳寿命节点，并进行无损检测；如发现裂纹应扩大检验范围，检查后应对裂纹进行标记以便后续处理，必要时进行简单处理。

(5) 对平台的主要结构件，特别是高应力杆件以及其它严重腐蚀的构件进行测厚检验。

5.4.5 测量海床冲刷、桩腿倾斜和平台沉降等情况，包括因冲刷或淤积造成平台位置水深的变化等。

5.4.6 本章 5.6 要求的海生物检验。

5.4.7 防腐系统的检测，包括阴极保护系统（如电位测量、牺牲阳极的耗蚀率等）和防腐涂层完好性检测，以判断防腐系统提供保护的有效性。

5.4.8 检查可能影响结构整体性的结构或荷载的变化情况。

第 5 节 桩基形位测量与桩基弱化

5.5.1 桩基形位测量

(1) 平台海底地基形位变化反应了平台结构基础约束土层厚度的变化，在结构分析应考虑地基形位变化导致结构约束条件的变化。

(2) 平台海底地基形位应采用测量精度小于 $\pm 0.5\%$ 三维自动成像地基形位测量仪，全面测量海床冲刷情况，确定海床冲刷深度。

5.5.2 桩基弱化

桩基土在海洋环境荷载长期作用下，将引起其承载能力的降低。在进行平台结构安全评估考虑桩基土对结构提供的约束条件时，应考虑在海洋环境荷载长期作用下桩基土的弱化，具体计算公式应参考目前已证明有效的考虑桩基弱化公式。

第 6 节 海生物附着厚度测量

5.6.1 平台结构海生物附着将增大结构受荷载作用尺寸，改变周围流场特性，影响荷载作用大小应检查结构上附着的海生物情况(包括种类、表面粗糙程度等)，在结构荷载计算时考虑其影响。

5.6.2 根据海生物在平台结构上沿垂直方向的分布情况，按不同水深测量海生物附着厚度。

第 6 章 结构模拟

第 1 节 一般规定

6.1.1 建立平台的三维有限元模型进行平台结构的安全评估，宜采用海洋平台结构计算软件（如 Structural Analysis Computer System, SACS）。结构模型应包括平台主体结构和相关附属构件。

6.1.2 合理地模拟各种边界条件是获得可靠荷载效应计算结果的必要条件，对于结构安全评估结构的可靠性具有重要的影响。

6.1.3 在役平台结构典型损伤对构件性能的影响应在平台结构计算软件中能够体现。

第 2 节 总体坐标系

6.2.1 建立模型时所采用的总体坐标系统多为直角坐标系，其中 X、Y 为水平轴，Z 为竖直轴，三者关系满足右手定则。为便于表述，坐标原点的选取须根据平台结构的对称性来确定。

第 3 节 单元类型

6.3.1 进行平台结构分析评价时，单元类型一般选取梁单元、板壳单元，其中梁单元多用于模拟桩腿结构、导管架结构和导管架帽的梁柱构件等；板壳单元多用于模拟平台甲板。

第 4 节 在役结构有限元建模

6.4.1 为真实反映实际构件的连接，建立模型时应考虑单元偏心的影响。可采用设置构件连接点偏移量计入有限元模型中，以反映结点的刚度、尺度以及构件弯曲组合截面特性。为使偏移量的设定更加方便，单元局部坐标系的选取须遵从相同的规则。

6.4.2 对于圆柱形受压构件，可参考 API RP2A 给出的有效长度系数。

6.4.3 建模时应考虑到飞溅区的腐蚀余量，以及检测报告所显示的构件实际腐蚀量。对处于冰作用区内的杆件，还要考虑冰的磨蚀，无资料时可取 0.1mm/年。在疲劳分析中可取 1/2 的飞溅区腐蚀余量。

6.4.4 对于扶梯、靠船件、与平台相连的立管等结构，可以处理为非结构单元，即考虑自重和作用其上的环境荷载对平台主体的影响，而忽略其对平台总体刚度的贡献。

6.4.5 对隔水套管的模拟，应根据其与平台主体结构的连接方式来判断其对平台整体刚度的影响。若刚度贡献较大，应按结构单元来模拟，否则可以处理成非结构单元。

6.4.6 海生物的厚度、密度等应按照最新的检测结果输入到模型文件中。

6.4.7 对构件腐蚀、裂纹和凹陷模拟，仅对结构单元上的损伤进行模拟，对于非结构单元上的损伤不模拟。为了便于采用海洋平台结构专用分析软件分析，构件损伤模拟采用极限强度折减和刚度折减的方式来模拟（可参考附录 A.6）。

(1) 腐蚀对构件性能影响的模拟

腐蚀分为均匀腐蚀和点腐蚀。均匀腐蚀的对构件的影响通过构件初始壁厚减去均匀腐蚀厚度且构件内径不变来模拟。点腐蚀对构件性能影响通过极限强度折减和刚度折减来模拟。点腐蚀对构件极限强度的影响可参考有关研究成果。考虑点腐蚀对刚度的影响认为管构件的外径不变，壁厚按刚度等效原则确定。

(2) 穿透裂纹对构件性能影响的模拟

穿透裂纹对构件性能影响通过强度折减考虑。

(3) 凹陷对构件性能影响的模拟

凹陷对构件性能影响通过极限强度折减和刚度折减来模拟。凹陷对构件极限强度的影响可参考有关公开发表的研究成果，刚度折减可按刚度等效原则确定。

(4) 疲劳累积损伤对构件性能影响的模拟

疲劳累积损伤对构件性能影响通过极限强度折减来模拟。

6.4.8 重力荷载应包括平台的固定重量（包括结构、设备、附属构件），实际活荷载和75%的最大供应和储备荷载。用于动力分析中的质量应包括相应于重力荷载的质量、包含在结构和附属构件中的流体质量以及附加质量。分析模型应包括平台刚度和质量在三个方向上的分布，应考虑平台刚度或质量的不对称分布可能会引起的显著扭转响应。

6.4.9 在计算有支撑的桩基结构的动力特性时，除非有其他资料明确给出另外的阻尼值，对于弹性分析，推荐使用5%的临界振型阻尼比。

6.4.10 地震分析中桩—土系统的模拟可采用简化等效桩或者直接给出桩头的等效刚度矩阵。获得等效刚度矩阵时所选用的荷载工况须与设计地震荷载相一致，即需考虑到重力的作用以及相应的地面运动加速度。

6.4.11 用于模型修正的在役海洋平台结构模型在建模时应尽可能准确地考虑上述各种因素对结构刚度和结构质量的分布的影响。

第5节 桩土相互作用

6.5.1 对固定平台应采用合理的桩—土相互作用模型来模拟基础对桩基的作用。群桩形式的平台计算时应考虑群桩系数。分析中常用的是直接输入土壤特性参数，包括：T-Z，Q-Z以及P-Y曲线数据，它们分别描述土壤对桩的轴向作用力、桩尖承载力以及土壤的横向承载力，应考虑桩基弱化和基础冲刷厚度对桩基土极限承载力的折减，具体折减计算方法参考5.5部分。

第 7 章 结构确定性安全分析评估

第 1 节 一般规定

7.1.1 在役平台应根据其当前的结构状况进行评估,即考虑腐蚀、机械损伤(凹陷)、裂纹等损伤对结构的影响更新结构模型,结构模拟参考第 6 章。

7.1.2 在役平台结构确定性安全评估分结构构件和结构整体确定性安全评估两个层次,一般应先进行结构构件层次安全评估(按评估荷载标准确定荷载取值的更新结构模型受力分析与校核),如未通过结构构件 A 级安全准则,则应根据本章规定进行极限强度分析评估。

7.1.3 本章未予规定者,应符合 API RP 2A—WSD 的相关要求。

第 2 节 结构构件确定性安全评估

7.2.1 构件确定性安全评估原理

目前平台结构设计以 API RP 2A—WSD 规范指导,对构件安全校核采用构件应力比为参数进行。构件确定性安全评估也采用构件应力比为参数进行。

结构构件的应力比 U_c 定义为

$$U_c = \sigma / [\sigma] \quad (7-1)$$

式中: σ ——评估荷载作用下修正结构模型计算的结构实际最大应力,可通过结构计算软件(如 SACS)计算;

$[\sigma]$ ——构件在该受力状态下的允许应力,其计算参考 API 规范。

当构件的应力比 U_c 小于 1 时,结构具有足够的安全性;当构件的应力比 U_c 等于 1 时,从设计角度来说,结构处于临界危险状态,但是从安全评估的角度来说,由于安全系数具有一定的安全储备,结构的安全性应引起重视;当构件的应力比 U_c 大于 1 时,结构具有的安全性就越低,应逐步引起更高的重视,当应力比 U_c 达到耗尽结构的安全系数储备的安全储备时,结构构件随时有可能破坏。根据结构的不同安全要求确定构件安全分级标准及构件安全分级标准各安全等级对应的应力比。因此根据构件应力比和构件安全分级标准可确定结构构件的安全等级。

7.2.2 结构构件安全评估参数确定

(1) 构件荷载效应计算

结构构件荷载效应计算是为了计算构件的应力比,用于确定构件的安全等级。用于荷载效应计算的荷载或环境荷载要素取值需参考第 4 章的荷载标准确定。用于荷载效应计算的结构模型应是反应结构当前状态的有限元模型,因此其有限元结构建模可参考第 6 章。根据荷载取值和结构模型根据力法等基本方法可计算构件内力并计算相应的荷载效应,具体求解过程可通过结构计算软件(如 SACS)完成。

(2) 构件允许应力计算

许用应力的规定可参照 API RP 2A 和 AISC《建筑钢结构设计、制造和安装规范》的有关要求。对于极端环境条件下的构件应力水平校核,基本许用应力可以增加三分之一。

(3) 构件应力比计算

根据计算获得构件荷载效应和相应允许应力,结合式(7-1)可计算确定构件应力比。

7.2.3 构件安全等级划分标准

构件安全等级划分标准是根据结构的不同安全要求确定,目的是为了细化评估构件的安全等级,获得平台结构构件安全水平更多信息,而不是安全和不安全两种信息。结构构件安全等级划分为 A、B、C 和 D 四级,各安全等级的安全要求参考第 3 章的规定。

根据评估荷载作用下修正结构模型计算的结构构件的应力比 U_c 值,按表 7.2 的规定对各类构件进行安全等级划分。结合 3.3 规定的标准,确定结构构件的安全状况。

表 7.2 平台各类构件各安全等级对应应力比

安全等级		A 级	B 级	C 级	D 级
应力比	桩腿	$U_c < 1$	$1 \leq U_c < 1.14$	$1.14 \leq U_c < 1.25$	$U_c \geq 1.25$
	斜撑	$U_c < 1$	$1 \leq U_c < 1.19$	$1.19 \leq U_c < 1.33$	$U_c \geq 1.33$
	弦杆	$U_c < 1$	$1 \leq U_c < 1.19$	$1.19 \leq U_c < 1.33$	$U_c \geq 1.33$

第 3 节 结构整体确定性安全评估

7.3.1 结构整体确定性安全评估原理

结构的储备强度反应了结构超过设计荷载时的承受能力，反应了结构整体的安全水平。储备强度常用储备强度系数来表示。储备强度系数定义为结构倒塌时的荷载与设计荷载之比，也即是：

$$R_s = \frac{F_u}{F_d} \quad (7-2)$$

式中： F_u 、 F_d ——平台结构极限荷载下和设计荷载下的基底剪力或倾覆力矩(当平台结构安装水深较大时，宜用结构的倾覆力矩；当平台结构安装水深较小时，宜用结构的基底剪力)。

平台结构极限荷载下的基底剪力或倾覆力矩实质上是结构的极限承载能力，因此储备强度系数实质上反应了结构的整体安全储备。当结构储备强度系数大于 1 时，表明结构能够抵抗设计荷载，结构的安全水平较高；当结构储备强度系数小于 1 时，表明结构不能够抵抗设计荷载，抵抗荷载能力变小，结构破坏的风险增加，结构的安全水平较低。根据结构整体的不同安全要求可确定结构整体安全分级标准及各安全等级对应的储备强度系数。

7.3.2 结构整体安全评估参数确定

(1)结构的极限承载能力计算

平台结构的极限承载能力计算主要根据结构发生极限破坏可能的荷载工况采用静力非线性方法确定。结构的极限承载能力计算的结构模型必须是反应结构当前状态的有限元模型，因此其有限元结构建模可参考第 6 章。通过上述方法计算的结构极限承载能力才是当前结构的真实承载能力。

(2)结构整体荷载效应计算

根据在役结构模型和设计荷载，结合结构计算软件（如 SACS）可以计算与结构极限承载能力(基底剪力或倾覆力矩)对应的结构荷载效应(底剪力或倾覆力矩)。

(3)结构储备强度系数计算

根据计算获得结构极限承载能力其相应的结构整体荷载效应，结合式(7-2)可计算确定结构的储备强度系数。

7.3.3 结构整体安全等级划分标准

结构整体安全等级划分标准是根据结构的不同安全要求确定，目的是为了细化评估结构的安全等级，获得平台结构整体安全水平更多信息，而不是安全和不安全两种信息。。

根据在役平台结构计算的储备强度系数 R_s ，按照表 7.3 对平台结构整体安全评估等级划分为 A、B、C、D 级，结合 3.3 规定，确定平台结构体系的整体安全状况。

表 7.3 平台结构体系安全分级标准对应储备强度系数渤海地区推荐值

安全等级 结构重要性	A 级	B 级	C 级	D 级
I 类结构	$R_s \geq 1.8$	$1.8 > R_s \geq 1.6$	$1.6 > R_s \geq 1.45$	$1.45 > R_s$
II 类结构	$R_s \geq 1.45$	$1.45 > R_s \geq 1.25$	$1.25 > R_s \geq 1.1$	$1.1 > R_s$
III 类结构	$R_s \geq 1.1$	$1.1 > R_s \geq 0.9$	$0.9 > R_s \geq 0.8$	$0.8 > R_s$

7.3.4 地震工况结构整体安全评估

对于要求地震设防的平台，应根据 API 标准要求进行平台结构整体安全评估。

第 8 章 结构可靠性安全分析评估

第 1 节 一般规定

8.1.1 结构可靠性安全评估方法是以考虑结构荷载、抗力的随机性的表示结构安全水平的可靠指标为安全评估参数,结合以可靠指标为参数描述不同安全等级要求的结构安全分级标准对结构安全进行评估。

8.1.2 结构的极限状态

- (1) 结构可靠性安全评估方法只考虑结构极限承载能力极限状态;
- (2) 结构构件承载能力极限状态分为:轴向拉伸和弯曲联合作用承载能力极限状态、轴向压缩和弯曲联合作用承载能力极限状态、剪力作用承载能力极限状态;
- (3) 结构节点承载能力极限状态为轴向拉伸和弯曲联合作用承载能力极限状态。
- (4) 结构整体承载能力极限状态分为结构基底剪力承载能力极限状态和结构倾覆力矩承载能力极限状态,当平台结构安装水深大于 30m 时,宜用结构倾覆力矩承载能力极限状态;当平台结构安装水深小于 30m 时,结构基底剪力承载能力极限状态。

8.1.3 评估荷载效应概率模型

在构件可靠性安全评估中,假定结构取于弹性阶段,则评估荷载效应与评估荷载存在线性关系;在结构整体安全评估中,由于采用结构基底剪力承载能力极限状态和结构倾覆力矩承载能力极限状态,则评估荷载效应与评估荷载同样存在线性关系,因此假定评估荷载效应与评估荷载存在线性关系为:

$$S_F = \lambda F \quad (8-1)$$

式中: S_F ——结构的荷载效应随机变量;

F ——作用于结构的荷载随机变量;

λ ——荷载效应系数,可采用结构计算软件(如 SACS)软件计算获得。

根据式(8-1)可根据荷载随机变量的概率特征参数计算荷载效应随机变量的概率特征参数,假定荷载与荷载效应服从相同分布,则根据荷载效应随机变量的概率特征参数可确定其概率模型参数。

结构荷载效应系数的计算应采用反应结构当前状态的有限元模型,因此其有限元结构建模可参考第 6 章。

第 2 节 结构构件可靠性安全评估

8.2.1 构件抗力概率模型

平台结构构件抗力的计算公式可参考 API RP 2A-WSD 3.1 规定,基于反应结构当前状态的有限元模型,结合结构计算软件(如 SACS)可计算构件抗力。若材料参数、结构尺寸输入值为标准值时,则结构计算软件可计算构件抗力也为标准值,则抗力的统计特征参数为:

$$\begin{aligned} m_R &= K_R R_K \\ \sigma_R &= \delta_R K_R R_K \end{aligned} \quad (8-1)$$

式中: m_R ——抗力的均值;

σ_R ——抗力的标准差;

R_K ——抗力标准值;

K_R 、 δ_R ——分别为抗力的均值系数和变异系数,可参考表 8.1 的取值。

表 8.1 构件抗力的统计参数

参数	均值系数	变异系数	分布类型	
构件	轴拉	1.193	0.071	对数正态
	轴压(整体失稳)	1.159	0.115	对数正态
	轴压(局部失稳)	1.233	0.100	对数正态
	弯曲	1.323	0.110	对数正态
	剪切	1.193	0.087	对数正态
管节点	X 型受压	1.203	0.162	对数正态
	X 型受拉	1.681	0.178	对数正态
	T 型受压	1.280	0.218	对数正态
	T 型受拉	1.529	0.282	对数正态
	K 型	1.589	0.238	对数正态
	平面内弯曲	1.318	0.234	对数正态
	平面外弯曲	1.143	0.254	对数正态

8.2.2 构件可靠度计算

构件功能函数可表示为：

$$Z = g(R_1, R_2, \dots, R_n; S_1, S_2, \dots, S_m) \quad (8-2)$$

式中： R_1, R_2, \dots, R_n ——与构件抗力相关的随机变量，参考 8.2.1 部分的方法可确定其概率分布；

S_1, S_2, \dots, S_m ——与构件荷载效应相关的随机变量，参考 8.1.2 部分的方法可确定其概率分布，则采用 JC 方法可计算构件的可靠指标。

结构构件可靠度安全评估考虑构件轴向拉伸和弯曲联合作用承载能力极限状态、轴向压缩和弯曲联合作用承载能力极限状态、剪力作用承载能力极限状态三种受力极限状态，因此可计算获得相应的三个可靠指标，最终构件的可靠指标取其中最小可靠指标。

8.2.3 构件可靠度安全等级划分标准

根据评估荷载作用下修正结构模型计算的结构构件的可靠指标，构件各安全等级对应可靠指标参数取值应按表 8.2 将各类构件各安全等级划分为 A、B、C、D 级，结合 3.3 规定，确定结构构件的安全状况。

表 8.2 平台各类构件各安全等级对应可靠指标渤海地区推荐值

安全等级		A 级	B 级	C 级	D 级
可靠度 β	导管腿	$\beta \geq 4.20$	$4.20 > \beta \geq 3.70$	$3.70 > \beta \geq 3.36$	$3.36 > \beta$
	斜撑	$\beta \geq 3.60$	$3.60 > \beta \geq 3.02$	$3.02 > \beta \geq 2.70$	$2.70 > \beta$
	弦杆	$\beta \geq 3.60$	$3.60 > \beta \geq 3.02$	$3.02 > \beta \geq 2.70$	$2.70 > \beta$

第 3 节 结构整体可靠性安全评估

8.3.1 结构整体抗力概率模型

(1) 与荷载随机性相比，抗力的随机性可以忽略不计，抗力可按确定性变量考虑，则可参考本指南 7.3.2 部分结构极限承载能力计算方法确定结构的整体抗力。

(2) 当结构整体安全评估要考虑结构整体抗力随机性时，则需要确定结构整体的抗力概率模型。结构整体的抗力概率模型可采用蒙特卡罗方法结合结构极限承载能力计算方法确定。影响结构抗力的随机参数每一次抽样就是一次结构极限承载能力计算，根据多次抽样计算结果计算结构整体抗力的均值和标准差，结构整体抗力一般服从对数正态分布，则可确定其分布参数。确定结构整体抗力需用到的材料和几何尺寸参数的统计参数可参考表 8.3。

表 8.3 影响结构抗力随机性的统计参数

参数类型	均值系数	变异系数	分布类型
圆管直径	1.000	0.0025	正态
壁厚	1.000	0.015~0.050	正态
屈服应力	1.193	0.050	正态
杨氏弹性模量	1.000	0.050	正态

8.3.2 结构体系可靠度计算

结构整体功能可以通过结构整体极限承载能力和其对应的荷载效应来描述，因此其功能函数可表达为：

$$Z = R - S_1 - S_2 - \dots - S_n \quad (8-3)$$

式中： R ——结构整体极限承载能力，也即是结构整体抗力；

S_1, S_2, \dots, S_n ——与结构整体极限承载能力对应的 n 个荷载效应。采用前面介绍的方法可以确定结构整体极限承载能力及其对应的荷载效应的概率模型，则采用 JC 方法可计算构件的可靠指标。

8.3.3 结构体系可靠度安全等级划分标准

根据评估荷载概率模型、体系抗力概率模型计算获得在役结构的整体可靠指标，按照表 8.4 将结构安全等级划分为 A、B、C、D 级，结合 3.3 的规定可确定结构整体的安全状况。

表 8.4 平台结构整体安全分级标准对应可靠指标渤海地区推荐值

安全等级 结构重要性	A 级	B 级	C 级	D 级
I 类结构	$\beta_s \geq 4.2$	$4.2 > \beta_s \geq 3.8$	$3.8 > \beta_s \geq 3.4$	$3.4 > \beta_s$
II 类结构	$\beta_s \geq 3.7$	$3.7 > \beta_s \geq 3.2$	$3.2 > \beta_s \geq 2.9$	$2.9 > \beta_s$
III 类结构	$\beta_s \geq 3.2$	$3.2 > \beta_s \geq 2.7$	$2.7 > \beta_s \geq 2.4$	$2.4 > \beta_s$

第9章 平台结构构件疲劳分析与寿命预测

第1节 一般规定

9.1.1 平台结构构件确定性疲劳分析方法通常包括简化疲劳分析方法和谱疲劳分析方法。对于非常重要的平台结构，建议做进行谱疲劳分析。

9.1.2 平台结构构件可靠性疲劳分析是考虑疲劳累积损伤对抗力的影响、荷载效应随机性和抗力随机性计算允许可靠指标下的使用寿命。

第2节 构件确定性疲劳分析

9.2.1 平台结构构件的疲劳强度分析方法通常包括简化分析方法和谱疲劳分析方法。

9.2.2 简化疲劳分析方法

简化疲劳分析的目的在于验证管节点在疲劳设计波浪下的峰值热点应力是否超过容许峰值热点应力。当平台满足下述条件时，可以采用简化疲劳分析方法：

- (1) 水深小于 122m；
- (2) 用韧性钢材建造；
- (3) 超静定结构框架；
- (4) 自振周期小于 3s。

构件简化疲劳分析具体要求可以参照 API RP 2A 中关于简化疲劳估计的相关规定。

9.2.3 谱疲劳分析方法

谱疲劳分析方法就是采用 S-N 曲线线性累积损伤方法计算节点损伤指数和疲劳寿命。假定构件在各个应力幅作用下引起的疲劳损伤是独立的，根据线性累积损伤准则，构件的疲劳损伤指数为：

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n(\sigma_{ri})}{N(\sigma_{ri})} \quad (9-1)$$

式中：D——疲劳损伤指数；

$n(\sigma_{ri})$ ——应力幅 σ_{ri} 对应的实际循环次数；

$N(\sigma_{ri})$ ——S-N 曲线中应力幅 σ_{ri} 对应的疲劳破坏循环次数；

m——总应力幅个数。

如果按照一年来计算疲劳损伤，则节点的总寿命 T(年)为：

$$T = \frac{1}{S_f D} \quad (9-2)$$

式中：D——疲劳损伤指数；

S_f ——疲劳安全系数。

谱疲劳分析方法的关键是选择 S-N 曲线、计算作用于节点的应力幅和应力集中系数，可参照 API RP 2A-WSD 中关于详细疲劳分析的相关规定。

第3节 构件可靠性疲劳分析

9.3.1 构件可靠性疲劳分析是针对结构构件极限承载能力状态，考虑疲劳累积损伤对结构材料强度影响，建立考虑疲劳的时变抗力模型，考虑抗力和荷载的随机性，采用时变可靠度分析方法计算疲劳对结构安全性的影响，结合在役结构的安全要求对构件疲劳寿命进行预测。

9.3.2 结构构件的极限状态

宜选择疲劳累积损伤严重的节点建立功能函数：

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t) \quad (9-3)$$

式中：R(t)——考虑疲劳累积损伤影响结构节点时变抗力；

S_G ——与抗力相应的恒荷载效应；

$S_Q(t)$ ——与抗力相应的可变荷载效应。

考虑疲劳累积损伤影响节点时变抗力可统一表示为：

$$R(t) = \phi(t)R_0 \quad (9-4)$$

式中： R_0 ——节点初始抗力；

$\phi(t)$ ——考虑疲劳的抗力衰减系数。

9.3.3 节点荷载效应概率模型

假定结构取于弹性阶段，则评估荷载效应与评估荷载存在线性关系；因此假定评估荷载效应与评估荷载存在线性关系为：

$$S_F = \lambda F \quad (9-5)$$

式中： S_F ——结构的荷载效应随机变量；

F ——作用于结构的荷载随机变量；

λ ——荷载效应系数，可采用结构计算软件(如 SACS)计算获得。

根据式(9-5)可根据荷载随机变量的概率特征参数计算荷载效应随机变量的概率特征参数，假定荷载与荷载效应服从相同分布，则根据荷载效应随机变量的概率特征参数可确定其概率模型参数。

结构荷载效应系数的计算应采用反应结构当前状态的有限元模型，因此其有限元结构建模可参考第 6 章。

9.3.4 抗力时变概率模型

根据节点时变抗力式(9-4)的表达式，只考虑初始抗力的随机性，抗力衰减系数为确定性时变函数。考虑初始抗力的随机性概率模型确定方法可参考本指南 8.2.1 构件抗力概率模型确定方法。

9.3.5 时变可靠度计算分析

由于疲劳累积损伤的影响，抗力 $R(t)$ 随时间不断变化，将评估基准期 T 分为 m 个相等的时段，可变荷载随机过程 $S_Q(t)$ 离散为 m 个随机变量 S_{Q_i} ，抗力随机过程也离散为 m 个随机变量 R_i ， R_i 的大小取为第 i 个时段抗力的中值，则可将式(9-1)整理为：

$$g(R_1, R_2, \dots, R_m, S_G, S_{Q_i}) = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp(-\alpha_T R_i) \right] - S_G - S_{Q_i} \quad (9-6)$$

式中： S_{Q_i} ——评估基准期内荷载效应最大值随机变量，其概率模型根据荷载年极值概率模型和评估基准期确定；

α_T ——评估基准期内荷载效应最大值随机变量极值 I 型分布的尺度参数。

功能函数式(9-6)可采用 JC 方法可计算构件的可靠指标。

9.3.6 平台结构构件寿命预测

根据时变可靠度计算方法可以计算可靠指标随机时间变化的情况，结构安全要求的最低可靠指标对应的的时间则是结构总使用时间，根据总使用时间减去已使用时间，则是结构剩余使用时间，它们之间的关系如图 9.1 所示。因此平台结构构件寿命预测计算流程见图 9.2。平台结构构件寿命预测的结构安全要求的最低可靠指标(结构寿命终止是的可靠指标)可根据业主要求和平台结构设计要求的可靠指标确定，一般建议取设计要求可靠指标的 0.85 倍。

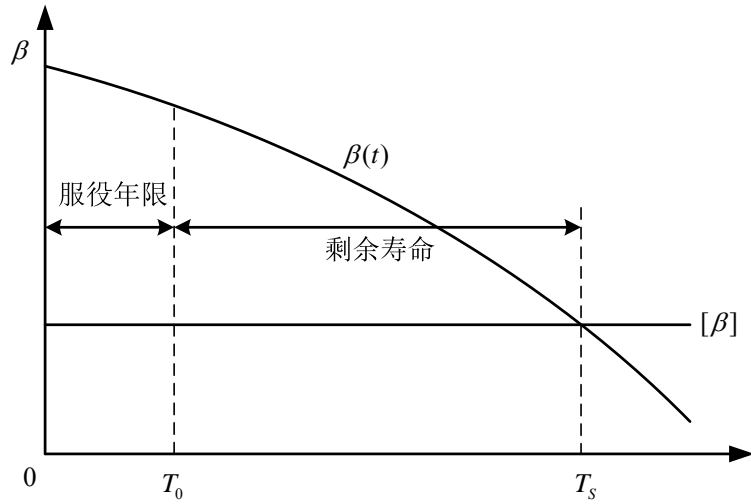


图 9.1 寿命预测方法示意图

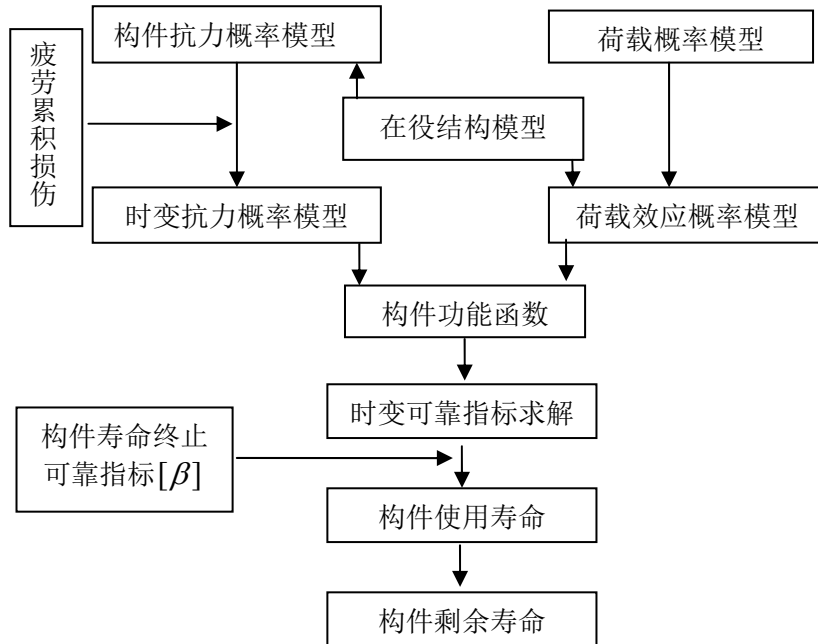


图 9.2 构件寿命预测流程图

附录 A 指南重要理论、方法的注释

A.3 关于第三章平台结构重要性与安全分级的注释

A.3.1 平台结构重要性分类

海洋平台结构的功能不同,结构的造价、生产的效益和居住人员数量不同,因此平台要求满足的安全程度也不同。结构失效导致的结构破坏、设备损毁等直接财产损失、生产停止导致产品停产的间接损失、导致环境污染恢复费用的间接经济损失等称为失效后果;工程结构事故对造成人员伤亡情况特别重视,往往用工程结构事故导致的人员伤亡数量作为工程事故大小的一个重要指标。导致可能人员伤亡的人员数量称为人命安全;根据结构失效后果和人命安全对结构重要性进行分类,结构安全评估时就可以根据平台结构的不用重要性类别选取不同安全要求对应的安全评估标准,是安全评估的结果与结构设计思想一致,因此本指南的结构重要性分类与 API 的结构重要性分类基本一致。

A.3.2 平台结构安全分级

平台结构安全评估不同于结构设计,结构设计要求结构构件的安全水平要求必须达到规范规定的安全要求,否则进行结构重新设计,直到满足规范规定的安全要求。结构安全评估是对已经存在的结构的安全状况进行确认,为结构采取维护、维修和拆除措施提供依据。结构安全状况不满足结构设计规范规定的安全要求,并不表示结构一定破坏,只是说明结构抵抗外界荷载作用的能力降低,结构的安全水平降低,结构的失效风险增加,因此应根据结构安全水平的不用降低情况划分结构安全等级,平台管理人员和业主可以根据平台的不同安全等级(不同的风险水平)情况采取相应的安全水平恢复措施,也就是维护、维修措施。

平台结构安全分级标准主要参考了《民用建筑可靠性鉴定标准》的安全分级标准,安全分级标准对应的描述结构安全水平的参数根据海洋平台结构设计水平相应的安全水平参数采用类比法确定。

A.4 关于第四章评估环境条件与荷载标准的注释

A.4.1 评估重现期和评估基准期

评估重现期是确定评估环境条件参数或评估环境荷载代表值选取时间参数,反应了评估环境条件参数或评估环境荷载平均出现时间间隔,其大小隐含了一定的风险水平,是决定估环境条件参数或评估环境荷载的取值的一个因素。

评估基准期是进行可靠性评估确定评估环境条件参数或评估环境荷载模型选取时间参数,反应了评估环境条件参数或评估环境荷载极值随机变量的参考时段长度,其大小隐含了一定的风险水平,是决定评估基准期内环境条件参数或评估环境荷载极值随机变量概率特征的一个因素。

A.4.2 极值环境要素概率模型更新方法

极值环境要素概率模型更新计算理论宜采用贝叶斯理论,考虑计算的实用性,采用基于正态变换的改进贝叶斯理论可获得更新极值 I 型参数估计得解析解,其计算过程如下:

(1) 根据式(4-1)的正态幂变换,应用先验样本和现场样本结合式(4-2)确定正态幂变换参数:

$$\begin{cases} y_i(\theta) = x_i^\theta (\theta \neq 0) \\ y_i(\theta) = \ln x_i (\theta = 0) \end{cases} \quad (4-1)$$

式中: θ ——变换参数,其矩估计为

$$\theta = 1 - \gamma / (3\delta) \quad (4-2)$$

式中: δ ——观测样本 X 的标准差系数;

γ ——观测样本 X 的偏度系数。

(2) 根据正态幂变换函数,将先验样本和现场样本变换为正态样本;

(3) 应用正态随机变量的 Bayes 更新理论对正态变换后的先验样本和现场样本进行 Bayes 估计,得到更新正态变换随机变量的均值和方差;

(4) 根据正态幂变换函数的反函数，结合随机变量函数的均值和方差求解方法，可获得考虑现场信息更新的原始空间随机变量的均值和方差。

(5) 根据极值随机变量服从极值 I 型分布的结论，根据更新原始空间随机变量的均值和方差，采用矩估方法可确定随机变量分布的分布参数。

A.5 关于第五章平台结构检测与损伤识别的注释

A.5.1 平台结构损伤识别初判原则

平台结构损伤识别初判原则：当结构的前三阶频率没有显著变化时，认为结构完整性没有明显变化，完成结构损伤初判；当结构前三阶频率有显著变化时，需选取结构损伤识别方法进行结构损伤计算，确定结构损伤程度和损伤位置。

海洋平台结构环境复杂，影响平台结构模态参数的因素多，结构模态参数变化与结构完整性变化规律还需继续深入研究，结构的前三阶频率显著变化的具体参数目前没有统一认识。但在实际工程应用时结构完整性是否发生明显变化，可根据平台历史资料和现场资料分析，结合王树青等人基于平台结构物理模型水池试验总结的平台结构损伤程度界定初判结构是否损伤。

A.5.2 平台结构振动检测与损伤识别流程

下面以渤海湾某平台为例说明平台结构振动检测与损伤识别流程。

A.5.2.1 平台结构

首先根据本指南第二章要求收集平台基础数据，建立其结构分析模型。本例中针对的位于渤海湾的某四腿导管架平台展开，其结构模型如图 A.5.1 所示。

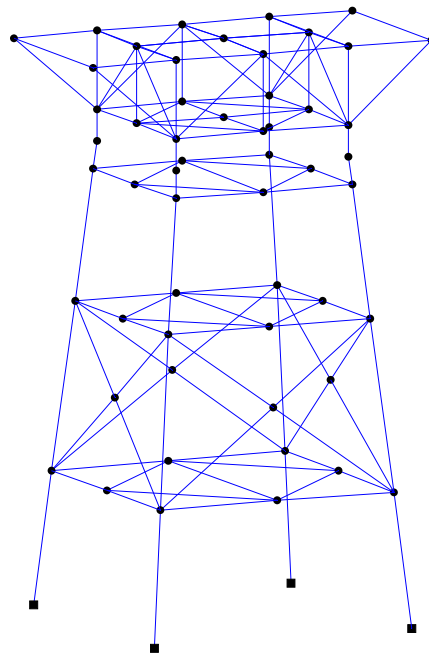


图 A.5.1 平台结构模型

A.5.2.2 传感器选择与安装

(1) 传感器的选取

根据 5.2.1 传感器的选取原则并考虑到目标平台的低频振动特性以及平台所在的环境，选用 Model 4803A-0002 型三向加速度传感器。该传感器为防水型低噪音三轴加速度传感器，基本技术参数如下：(1) 量程： $\pm 2g$ ；(2) 灵敏度： $1000mV/g$ ；(3) 频率范围： $0-150Hz$ ；(4) 非线性度： $\pm 0.5\%$ ；(5) 横向灵敏度： $<3\%$ ；

(2) 传感器的布置

根据 5.2.2 传感器的布置原则并结合测试目的对传感器的布置进行优化，传感器优化结果为布置三层（含水下一层四个角点位置）共 12 个测点，考虑到水下布置传感器的困难，

最终确定布置方案为水面以上四个桩腿上布置两层（分别在标高+5.8m 和+10m 处）传感器，具体布置情况如图 A.5.2 和 A.5.3 所示，共布置个 8 个三向传感器。

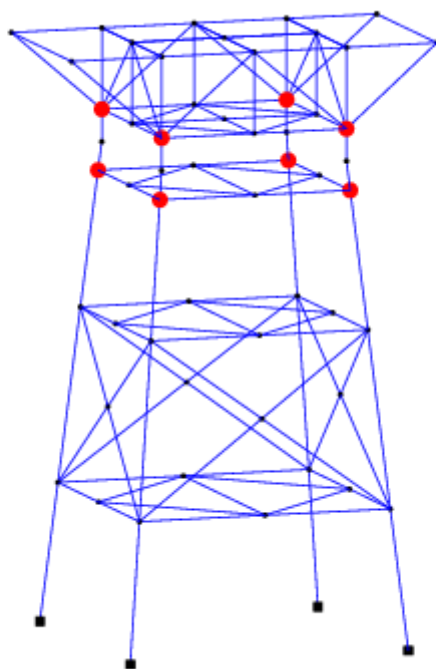


图 A.5.2 平台传感器布置图

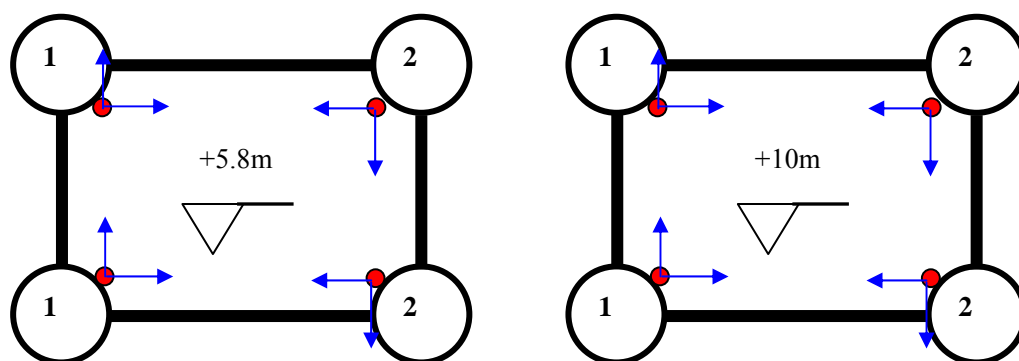


图 A.5.3 平台传感器布置图

(3) 传感器的安装

传感器应该牢固地固定在平台的选定测点上。常用的传感器的安装方式有螺钉安装、磁座安装及胶黏剂安装等。为了不损伤平台结构、安装牢固并易于拆卸，本处采用磁座安装，如图 A.5.4 所示。



图 A.5.4 有机玻璃固定块示意图

A.5.2.3 平台激励方式

常用的平台激励方式主要有工激励和环境荷载激励。按照指南 5.2.3 节并考虑目标平台所处的渤海湾冬季环境条件,本处选择环境荷载激励方式,采用冬季流冰对平台施加激励。

A.5.2.4 数据采集与信号处理

(1) 数据采集

将加速度传感器数据线接入数据采集仪,数据采集仪信号通过网线接入笔记本电脑,完成整个振动测试系统的连接。

采用等时间间隔采样,考虑到目标平台的低频振动特性,采样频率设为 100Hz。为了信号的完整,采样数据要有足够的长度,完整地记录冰激振动的过程。要对采集数据进行简单的分析,以保证采集数据的合理和有效。典型的平台冰激振动采集数据如图 A.5.5 所示。

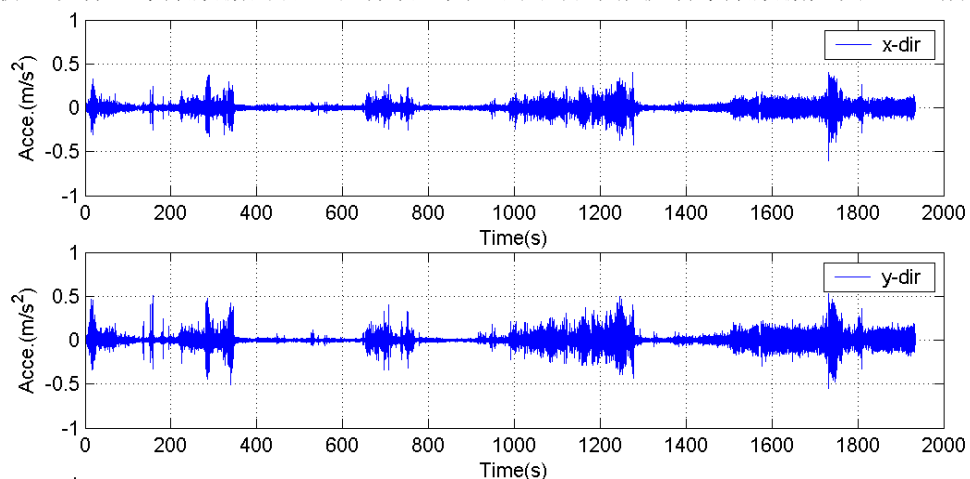


图 A.5.5 典型冰激振动测试数据

(2) 频谱分析

对上述数据进行频谱分析,如图 A.5.6 所示,可以发现采集信号低频振动明显。同时包含了一些高频分量和测试噪声。

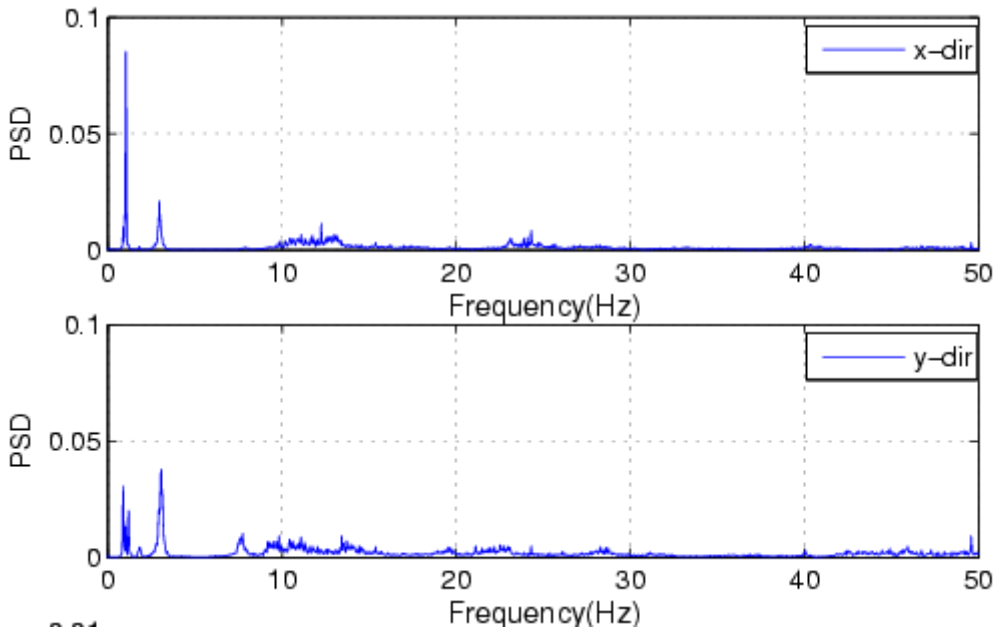


图 A.5.6 典型冰激振动测试数据的功率谱

采用信号的低频段的频率特征如图 A.5.7 所示。从中可以看出，在 1Hz 附近有三个峰值，其频率分别大约为 0.9Hz、1.0Hz 和 1.2Hz；在 3Hz 附近有 2 个峰，约为 2.9Hz 和 3.0Hz。分析不同测点 x 向和 y 向的谱可以确定：y 向 1 阶振动为 0.9Hz、x 向 1 阶振动为 1.0Hz、1 阶扭转振动为 1.2Hz；2.9Hz、3.0Hz 分别为 y 向、x 向的二阶振动。

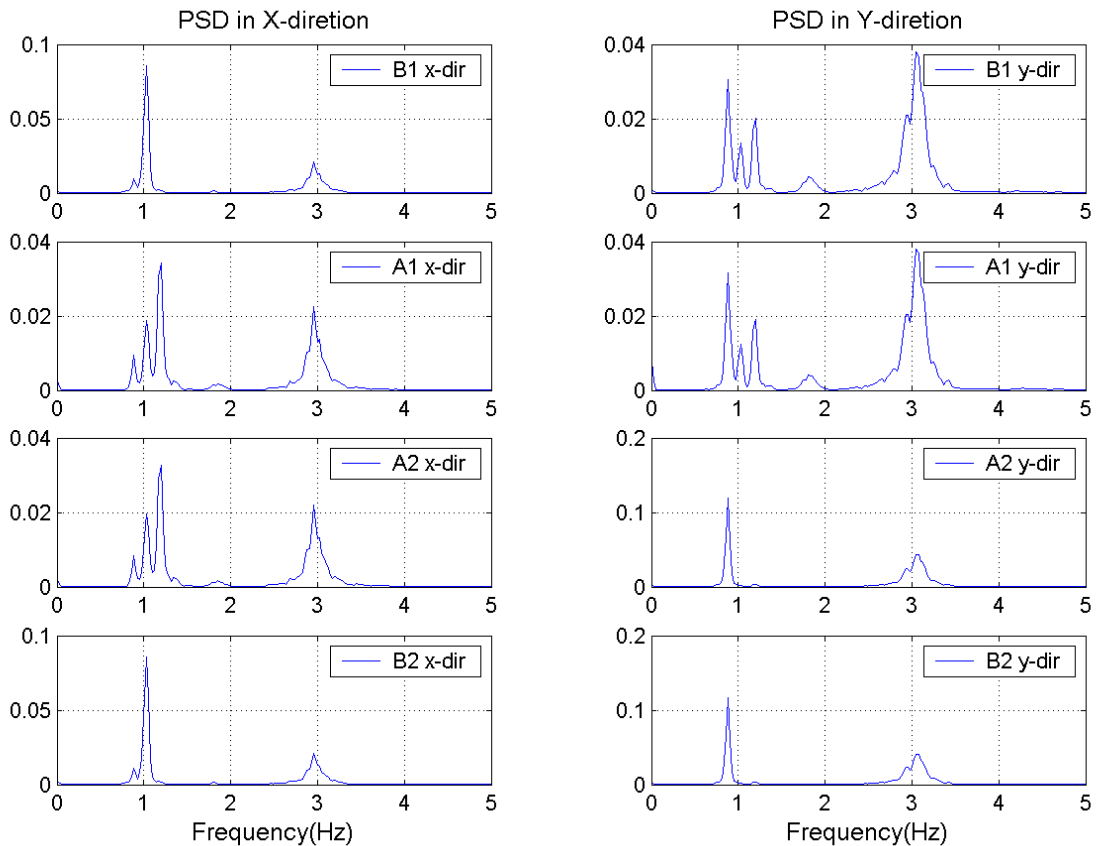


图 A.5.7 5.8m 高程处各测点的加速度谱

(3) 信号消噪

对传感器获得的量测信号，采用结构低秩逼近技术——Cadzow 理论进行噪声消除。图

A.5.2.8 显示了信号的消噪效果。

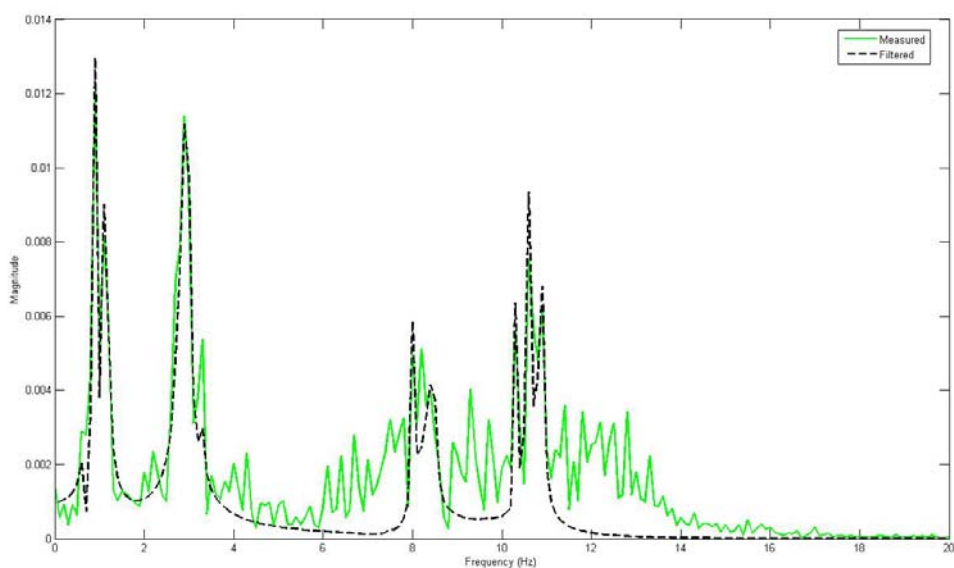


图 A.5.8 实测信号消噪效果

A.5.2.5 模态识别

对 8 个测点冰激振动测试数据进行模态参数识别, 识别得到的前 5 阶频率和阻尼比如表 A.5.1 所示, 前三阶阵型图如图 A.5.9 所示。可以看出, 第 1 阶振型为 y 方向, 并存在扭转; 2 阶为 x 方向, 存在扭转耦合; 3 阶为扭转模态;

表 A.5.1 识别得到的平台前 5 阶频率和阻尼比

阶次	1	2	3	4	5
频率 (Hz)	0.8976	1.0413	1.1631	2.9482	3.0582
阻尼比	0.0141	0.0152	0.0398	0.0155	0.0119

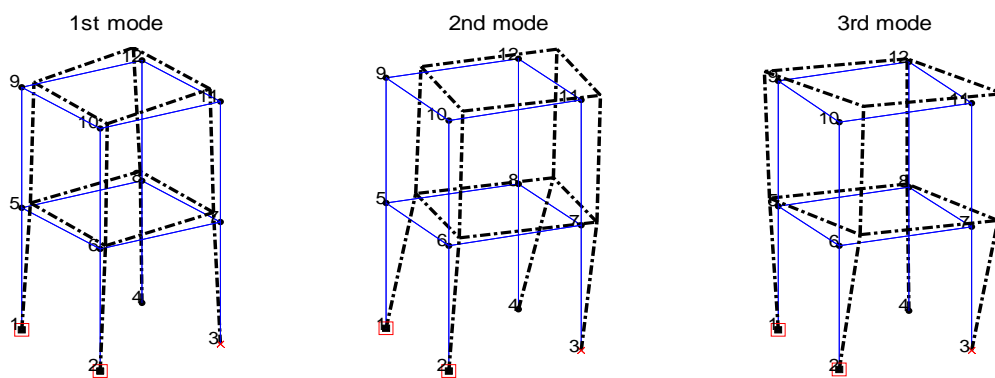


图 A.5.2.9 前三阶阵型图

A.5.2.6 结构模型修正

用实测得到的模态信息对有限元模型进行修正, 使修正后的模型动力特性更能反映实际结构的动力特性。采用交叉模型交叉模态修正方法(CMCM)进行模型修正。

(1) 有限元模型

根据设计资料及实际结构, 建立导管架的有限元简化模型, 如图 A.5.10 所示, 其中共有 58 个结点, 111 个 pipe 单元。由于甲板负重及上部模块的质量对结构的动力特性影响非常大, 因此对上部质量进行合理的简化是建模的关键。将上部模块与甲板融为一体, 该模型可有效

的避免集中质量模型产生的一些局部模态,且不会太大的改变各低阶模态的形态。在建模中,采用 6 个壳单元来模拟 (112—117 单元)。

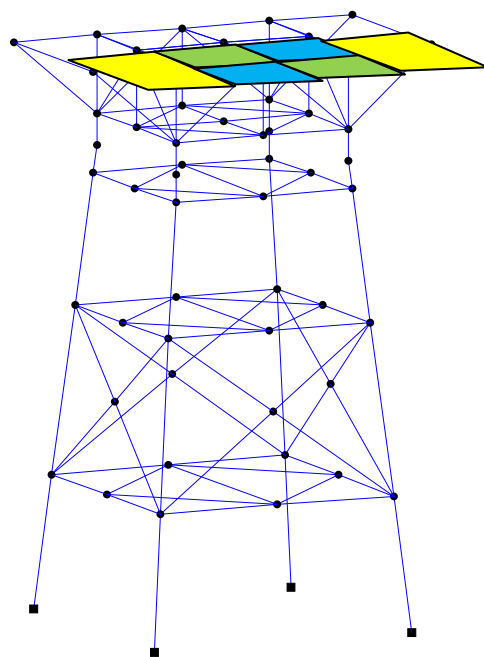


图 A.5.10 JZ20-2MUQ 导管架模型

通过特征值分析,得到该有限元模型的前 5 阶模态频率分别 0.878Hz、0.915 Hz、1.051 Hz; 振型如图 A.5.11 所示,第 1 阶为 y 方向,第 2 阶为 x 方向,第 3 阶为绕 z 轴扭转。

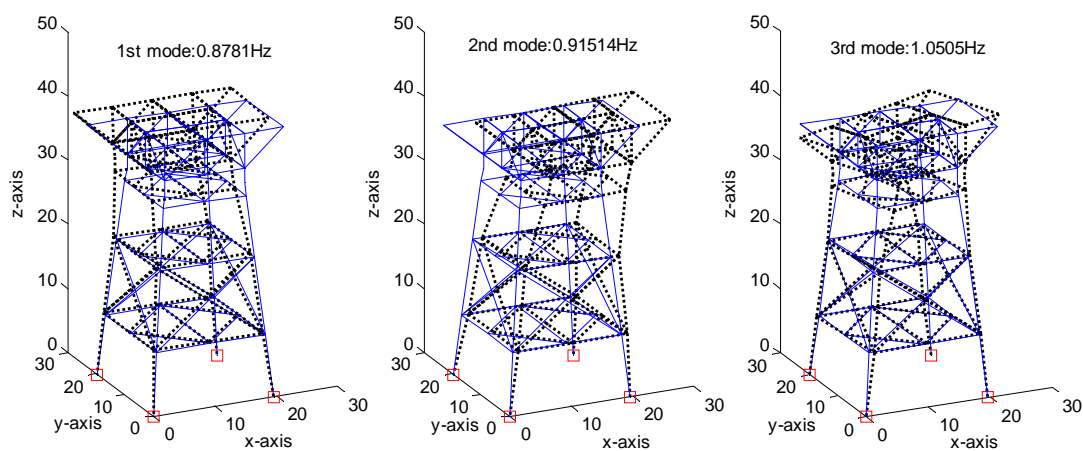


图 A.5.11 有限元模型前 3 阶振型

与表 A.5.1 所示实测结构模态参数识别结果对比发现,该有限元简化模型的低阶模态基本能够反映实际结构的形态,但频率和振型具体值尚有一定的误差,选用表 A.5.1 中识别的模态参数与有限元分析模态参数进行对比,如表 A.5.2 所示。

表 A.5.2 有限元模型模态参数与实测模态参数比较

阶数	FEM 频率 /Hz	实测频率 /Hz	频率误差 ε /%	MAC
1	0.878	0.8976	-2.18	0.9229
2	0.915	1.0413	-12.13	0.8543
3	1.051	1.1631	-9.64	0.7514

(2) 模型修正

选择前三阶模态作为目标修正模态，对其最灵敏且建模不确定性最大的参数为 shell 单元 112—117。因此考虑将该 6 个单元的质量矩阵做为修正对象，对初始有限元模型进行修正，来实现对前三阶模态的良好匹配。

采用交叉模型交叉模态（CMCM）方法，用前 3 阶分析模态和前 3 阶实测模态（扩阶振型）构建 9 个方程来求解 6 个质量修正系数，求解结果如图 A.5.12 所示，等效甲板质量均适当减小。修正结果如表 A.5.3 所示，有限元模型得到了一定程度的改善。

表 A.5.3 模型修正结果比较

阶数	实测频率/Hz	修正前模型			修正后模型		
		频率/Hz	误差 ε /%	MAC	频率/Hz	误差 ε /%	MAC
1	0.8976	0.878	-2.18	0.9229	0.934	4.28	0.928
2	1.0413	0.915	-12.13	0.8543	1.039	-0.32	0.922
3	1.1631	1.051	-9.64	0.7514	1.189	2.23	0.912

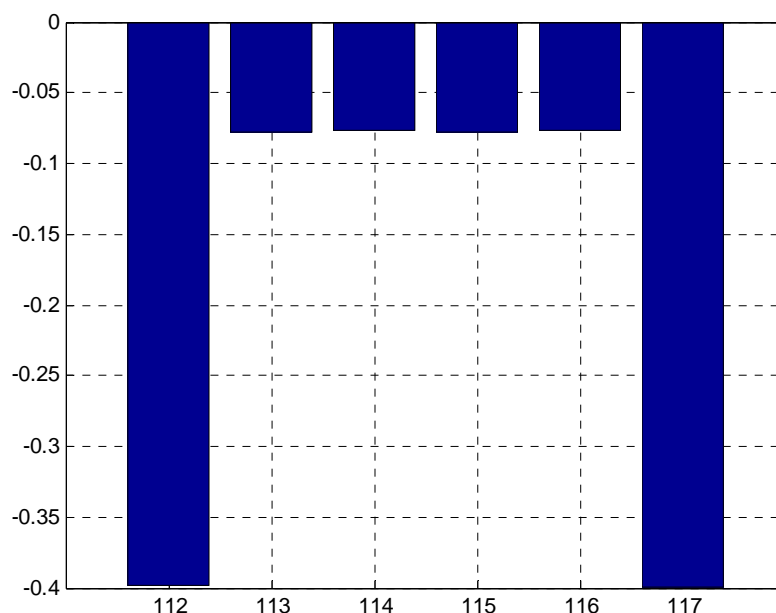


图 A.5.12 有限元模型修正求解结果

A.5.2.7 损伤识别

基于动力特性变化的损伤识别方法需要利用基准模型和在役/损伤结构的模态测试信息进行损伤识别，以判断结构在这两次测试期间的整体性能变化情况。假设在役结构立柱单元 51 发生损伤（如图 A.5.13），利用损伤结构的前 2 阶模态频率和振型进行损伤识别，结果如图 A.5.14 所示。从图中可以看出，单元 51 发生了损伤。

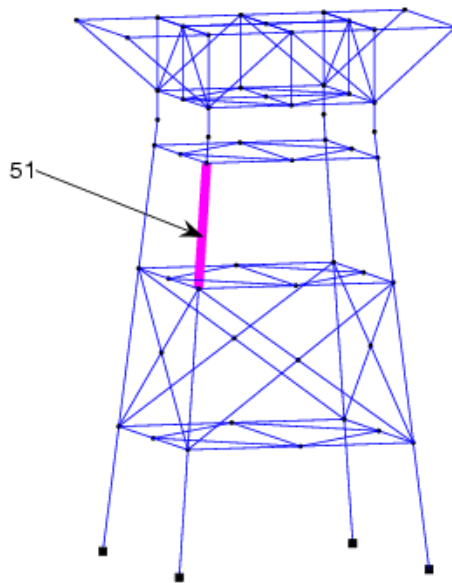


图 A.5.13 损伤单元示意图

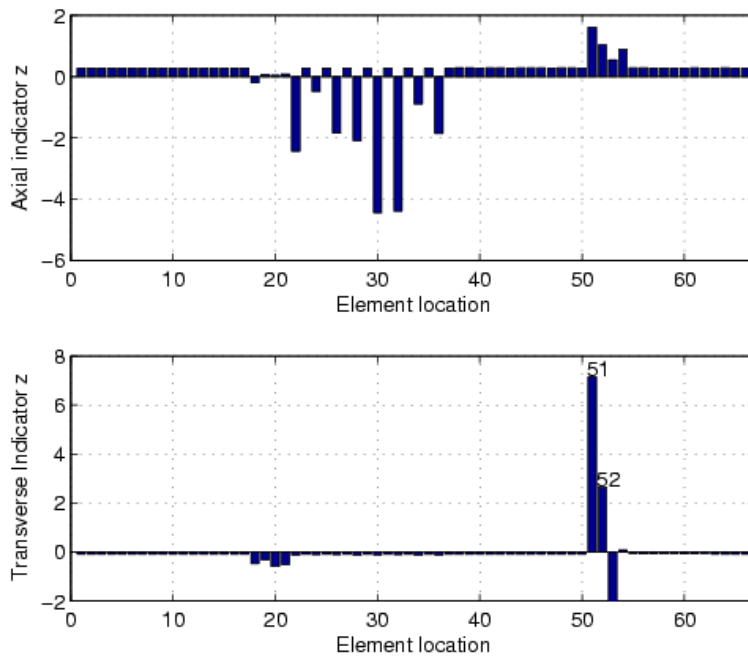


图 A.5.14 损伤检测结果

A.5.3 桩基弱化

平台在役使用过程中，除了承受结构自重以及甲板设备重量等静荷载作用外，还经常受到风、波浪、海流等环境动力荷载的作用。在这些水平动荷载作用下，土体间位置将发生调整而趋于密实，土体密实势必排除孔隙水。而在急剧的周期性动荷载作用下，如果土体的透水性不良而排水不畅的话，在极短时间内可能产生很大的超静孔隙水压力，致使土水体系内有效应力下降，抗剪强度降低。由于土体中累计孔隙水压力的上升而导致其抗剪强度下降的现象称为土的弱化。目前固定平台的桩基水平承载特性的设计规范是基于 API-RP2A 的 $p-y$ 曲线法，其采用的是 1970 年 Matlock 等通过现场试验建立的水平荷载作用下软粘土 $p-y$ 曲线公式， Reese 等基于砂土中的钢管桩的试验分析与研究获得的砂土的分段 $p-y$ 曲线，然而其试验中未能综合考虑动荷载下桩周土体的弱化特性，不能如实反映桩-土-结构间的相

互作用。平台结构安全评估针对的对象是在役平台，其已长期经受风、浪、流等水平动荷载的作用，桩基土一定发生了性能弱化，为了合理的考虑桩基土弱化后性能的变化，需对 API-RP2A 提供 p-y 曲线公式进行修正。段梦兰等人基于大量的实验室试验和数值试验分析与探索，结合 Dewaikar 等人的研究成果，给出了考虑桩基弱化及冲刷条件下 API 规范中土体极限抗力的修正公式：

$$\begin{aligned} P_u &= \delta \left[3C_u + \gamma(x-h) + J \frac{(x-h)C_u}{D} \right] & (0 \leq x \leq x_R) \\ P_u &= 9\delta C_u & (x \geq x_R) \end{aligned} \quad (5-1)$$

式中： P_u —— 桩侧向土极限抗力；

x —— 土下计算点深度；

C_u —— 不排水抗剪强度；

D —— 桩径；

γ —— 土体有效容重；

J —— 无因次常数，由试验确定， $J = 0.25 - 0.5$ ，土体较硬时取低值；

x_R —— 极限水平承载力的转折点深度；

h —— 冲刷深度；

δ —— 环境荷载作用下桩基土弱化折减系数，其计算公式为：

$$\delta = 1 - \alpha \left(1 - N^{-\beta \frac{y_0 0.1E}{0.2DC_u}} \right) \quad (5-2)$$

式中： y_0 —— 静载下泥面位移；

E —— 土体弹性模量；

α 、 β —— 拟合参数，分别取 0.7 和 0.0237；

N —— 环境荷载循环次数，一般取 200；其它参数同式(5-1)。

本指南建议采用该修正公式考虑桩基土的弱化。

A.6 关于第六章结构模拟的注释

A.6.1 穿透裂纹构件材料的剩余强度计算

构件出现裂纹不仅引起其材料性能的劣化，同时导致构件受力偏心，引起附加弯矩，在相同条件下，其承载能力降低，相当于其材料性能降低。因此为合理的考虑含裂纹构件性能的变化，需对其材料强度进行折减。

Paik 通过实验和系列数值模拟给出含穿透裂纹缺陷的矩形板极限拉伸强度简化计算公式：

$$\sigma_u = \left(1 - \frac{c}{b} \right) \sigma_s \quad (6-1)$$

式中： σ_u —— 中心穿透裂纹的矩形板的极限拉伸强度；

σ_s —— 材料的屈服应力；

c —— 裂纹半长；

b —— 矩形板半宽；

c/b —— 相对裂纹长度。

王芳等以具有中心穿透裂纹的正方形板为例，利用弹塑性有限元分析结果对 Paik 的公式进行了修正。薛景川等在试验结果分析的基础上，提出一种用于平板穿透裂纹的初步设计的快速、保守的剩余强度分析方法。李亚智基于试验和线性断裂强度理论提出的剩余强度分析的简便方法，该方法需要实验确定线弹性断裂强度，剩余极限强度的工程评估带来了不便。

针对上述研究都是针对平板构件，不是平台结构常用的管构件，周道成等人在 Paik、李亚智等人的研究成果，结合大量的有限元计算结果与分析，提出了穿透裂纹构件材料的剩余强度计算 Paik 修正公式：

$$\sigma_{ur}\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}, \lambda, \beta\right) = \begin{cases} \left[f_0(\lambda, \beta) + f_1\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}, \lambda, \beta\right) \right] \sigma_u & (0 < \lambda \sin \beta < 0.03) \\ f_2\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}, \lambda, \beta\right) \sigma_u & (0.03 \leq \lambda \sin \beta < 1) \end{cases} \quad (6-2)$$

式中： $f_0(\lambda, \beta) = 0.872 + 0.149 \exp(-135.26 \lambda \sin \beta)$

$$f_1\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}, \lambda, \beta\right) = \left[8.76 - 69.97 \frac{\sigma_y}{\sigma_u} + 72.33 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)^2 \right] \lambda \sin \beta$$

$$f_2\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}, \lambda, \beta\right) = \left(0.016 + 1.074 \frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right) \times (1 - \lambda \sin \beta)$$

式中： σ_y ——材料的屈服强度；

σ_u ——材料的极限强度；

β ——裂纹长度方向与构件轴向方向的夹角；

λ ——裂纹无量纲长度，且 $\lambda = \frac{2a}{\pi D}$ ，其中 D 为管的直径， $2a$ 为裂纹长度。

本指南建议采用该修正公式计算含穿透裂纹管构件材料的剩余强度。

A.6.2 凹陷构件材料的剩余强度计算

凹陷不仅使完好截面面积减小，同时引起轴向作用荷载的偏心作用，引起附加弯矩，相同轴向荷载作用下，凹陷损伤构件的应力比完好构件的应力大，若都按完好构件处理，则凹陷损伤构件的承载能力降低相当于构件的材料强度降低；凹陷构件材料剩余强度的计算可参考国际海洋、离岸和极地工程会议(OMAE)论文提供的方法。

A.6.3 疲劳累积损伤构件材料的剩余强度计算

海洋结构在疲劳荷载作用下，引起结构的疲劳累积损伤，使得结构的材料性能下降，因此疲劳累积损伤对构件性能影响可通过极限强度折减来模拟。

段忠东等人基于连续介质力学建立了疲劳损伤金属材料剩余强度模型：

$$\sigma_s(t) = \sigma_{s_0} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S_{\max}}{\sigma_{s_0}} \right)^c \right] D(t) \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (6-3)$$

式中： σ_{s_0} ——材料完好无损时的屈服应力；

S_{\max} ——循环最大应力；

$D(t)$ ——随机荷载作用下的疲劳累积损伤率；

c ——材料常数，对于平台结构材料一般取 1.25。

为验证该公式的合理性，周道成等人以海洋平台常用 D32 钢为对象，进行了大量试验，试验研究表明该公式能合理描述疲劳损伤金属材料剩余强度的变化特征。因此本指南建议采用该公式计算疲劳损伤金属构件剩余强度。

A.7 关于第七章结构确定性安全分析评估的注释

A.7.1 构件安全等级分级标准

应力比中隐含了安全系数，其同时反映了具有的安全水平，与结构可靠指标在描述结构安全水平方面具有一致性。平台结构安全分级标准主要参考了《民用建筑可靠性鉴定标准》的安全分级标准，应力比是根据构件可靠性评估时构件安全分级标准对应的描述结构安全水平的可靠指标确定；构件可靠性评估时构件安全分级标准对应的描述结构安全水平的可靠指

标的确定，见第八章结构可靠性安全评估方法的注释。

A.7.2 结构的极限承载能力计算

对于平台结构，可以用结构的极限基底剪力或倾覆力矩描述结构极限承载能力。平台结构的极限基底剪力或倾覆力矩可采用静力非线性方法计算确定。静力非线性方法就是结构可能荷载条件情况在结构有限元模型上施加相应荷载，并增量地施加其中的一个或多个主要控制荷载，使结构逐渐进入非线性状态，从而使结构各构件相继进入塑性，形成塑性铰或使构件失效，构件形成塑性铰或构件失效即修改其刚度（或使其退出工作），进而修改结构总刚度矩阵，进行下一步计算，依次循环直到预定的极限状态（结构位移达到规定的最大整体位移或局部位移），结构最终的极限状态对应的极限荷载即为结构的极限承载能力。

A.7.3 结构整体安全等级分级标准

平台结构安全分级标准主要参考了《民用建筑可靠性鉴定标准》的安全分级标准。结构安全分级标准对应描述结构安全水平的储备强度系数确定过程如下：首先整理收集了墨西哥湾平台储备强度系数计算分析结果；其次对我国海域已建平台进行分析，确定其储备强度系数，同时收集我国一些学者对其它平台的一些计算结果，得到我国部分平台储备强度系数水平；接下来分析我国海域和墨西哥湾海域平台的储备强度系数水平，结合我国国情，确定我国海域设计平台结构储备强度系数的建议取值，最后考虑平台结构体确定性安全分级标准与平台结构体系可靠度安全分级标准的一致性，根据平台结构体系可靠度安全分级标准各安全等级对应体系可靠指标的确定原则，类比的确定我国海域平台整体安全分级标准对应的储备强度系数取值。

A.8 关于第八章结构可靠性安全评估方法的注释

A.8.1 结构的极限状态

结构构件的极限状态主要参考 API RP 2A-LRFD 规定的构件极限状态，考虑结构设计与安全评估的一致性。

A.8.2 构件抗力统计参数

根据大量材料性能(强度、刚度等)的不确定性、构件几何参数的不确定性和抗力计算模式的不确定性统计分析结果，结合平台构件和管节点抗力的计算表达式，可计算得到构件抗力的统计参数。

A.8.3 结构构件可靠度安全等级划分标准

结构构件可靠度安全等级划分标准基于我国渤海海域已建平台结构可靠度水平，在此基础上参考《民用建筑可靠性鉴定标准》的安全分级标准各级可靠指标确定原则，采用类比的方法确定平台构件安全分级标准对应的描述结构安全水平的可靠指标。主要确定过程如下：首先根据我国渤海海洋环境荷载的统计参数和平台结构构件抗力的统计参数，根据工作应力法中规定的安全系数，采用校准法确定我国渤海海域平台结构的设计可靠度水平；其次根据《民用建筑可靠性鉴定标准》的安全分级标准各级可靠指标确定原则，确定其各安全等级对应可靠指标与设计水平可靠指标的关系；最后根据建筑结构构件各安全等级对应可靠指标与设计水平可靠指标的关系和平台结构设计结构具有的可靠度水平，采用类比的方法确定平台构件各安全分级相应的可靠指标。

A.8.4 结构体系可靠度安全等级划分标准

平台结构安全分级标准主要参考了《民用建筑可靠性鉴定标准》的安全分级标准和已发表的研究成果。结构安全分级标准对应描述结构安全水平的体系可靠指标确定过程如下：首先整理收集了设计平台结构体系可靠度水平的研究成果；其次对我国海域已建平台进行分析，确定其结构体系可靠度水平^[20]，同时收集我国一些学者对其它平台的一些计算结果，得到我国海上固定平台体系可靠度水平；接下来分析我国海域平台的体系可靠水平和已有平台结构要求具有的体系可靠度水平，结合我国的国情，确定我国设计结构体系可靠度水平；

最后根据建筑结构各安全等级对应体系可靠指标与结构体系设计水平可靠指标的关系和平台结构体系设计可靠度水平，采用类比的方法确定平台结构各安全分级相应的体系可靠指标。

A.9 关于第九章平台结构构件疲劳分析与寿命预测的注释

A.9.1 结构节点极限状态

平台结构的节点存在应力集中现象，疲劳累积损伤问题比一般杆件突出，因此仅选取结构节点进行可靠性疲劳分析与寿命预测。

A.9.2 结构节点时变抗力

节点破坏主要是冲剪破坏，因此节点时变抗力与节点冲剪校核时的抗力一致。

节点冲剪校核时轴向拉压抗力为：

$$P_a = Q_u Q_f \frac{\sigma_s T^2}{\sin \theta} \quad (9-1)$$

节点冲剪校核时弯曲抗力为：

$$M_a = Q_u Q_f \frac{\sigma_s T^2}{\sin \theta} (0.8d) \quad (9-2)$$

式中： σ_s ——结构材料的屈服强度；

T ——主管壁厚；

d ——支管直径；

θ ——支管轴线与；

Q_u ——极限强度系数；

Q_f ——考虑主管中存在轴向名义应力的修正系数。

结构疲劳累积损伤对结构材料性能的影响：

$$\sigma_s(t) = \sigma_{s_0} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S_{\max}}{\sigma_{s_0}} \right)^c \right] D(t) \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (9-3)$$

式中： σ_{s_0} ——材料完好无损时的屈服应力；

S_{\max} ——循环最大应力；

$D(t)$ ——随机荷载作用下的疲劳累积损伤率；

c ——材料常数，对于平台结构材料一般取 1.25。

考虑疲劳影响的时变轴向拉压抗力为：

$$P_a = Q_u Q_f \frac{\sigma_s T^2}{\sin \theta} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S_{\max}}{\sigma_{s_0}} \right)^c \right] D(t) \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (9-4)$$

支管冲剪校核时弯曲抗力为：

$$M_a = Q_u Q_f \frac{\sigma_s T^2}{\sin \theta} (0.8d) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S_{\max}}{\sigma_{s_0}} \right)^c \right] D(t) \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (9-5)$$

因此节点时变抗力可统一表示为：

$$R(t) = \phi(t) R_0 \quad (9-6)$$

式中： R_0 ——节点初始抗力，根据式(9-4)或(9-5)计算；

$\phi(t)$ ——考虑疲劳的抗力衰减系数，其计算公式为：

$$\phi(t) = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S_{\max}}{\sigma_{s_0}} \right)^c \right] D(t) \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (9-7)$$

式中：参数与式(9-3)相同。

附录 B 平台结构维修决策与建议

B.1 平台结构维修决策目的

平台结构维修决策的目的是根据平台结构的安全状况确定一种最佳的维修方案,为业主选择维修方法提供依据。

B.2 平台结构维修决策依据

平台结构维修决策依据主要考虑结构的在役现状、构件的可靠度水平和结构体系可靠度水平和结构体系可靠度变化的速率四种因素。

B.3 平台结构维修决策方法

平台结构维修决策方法采用多因素模糊综合决策方法,其计算过程如下:

(1)确定结构维修决策所考虑的因素,其考虑因素集为

$$U = \{U_1, U_2, U_3\} = \{\text{结构服役现状, 构件可靠度, 体系可靠度}\} \quad (3-1)$$

式中: U ——模糊综合决策的因素集。

(2)确定维修方法,维修方法通过维修等级表示,维修等级划分为四个等级:

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{A级维修, B级维修, C级维修, D级维修}\} \quad (3-2)$$

式中: V ——模糊综合决策的决断集。

A 级维修——平台结构整体安全符合安全标准对 A 级的要求,不影响整体承载,可能有个别构件应采取维护性措施;

B 级维修——平台结构整体安全性略低于安全标准对 A 级的要求,尚不显著影响整体承载,可能有少数构件应采取维护和维修措施,防止结构在役状况恶化的加剧,抑制结构安全度衰减速度,可不提高结构的实际安全水平。

C 级维修——平台结构整体安全性不符合安全标准对 A 级的要求,显著影响整体承载,应采取维修措施,且可能有少数构件必须立即采取措施,适当提高低可靠指标构件的安全水平,改善结构整体安全水平。

D 级维修——平台结构整体安全性极不符合安全标准对 A 级的要求,严重影响整体承载,必须立即采取措施,较大幅度地提高低可靠指标构件的安全水平,从而明显提高结构的整体安全水平。

(3)结构在役现状影响维修等级单因素模糊决策评定

结构在役现状划分为五个等级:

$$\{U_1: \text{结构服役现状}\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{\text{很好,较好,中等,较差,很差}\} \quad (3-3)$$

按五个等级由专家确定结构在役现状隶属于各个等级的程度,以隶属度向量的形式表示为(满足归一化条件):

$$\mu_{U_1} = \{\mu_{u_1}, \mu_{u_2}, \mu_{u_3}, \mu_{u_4}, \mu_{u_5}\} \quad (3-4)$$

式中: μ_{u_i} ——结构在役现状隶属于第 u_i 等级的程度。

结构在役现状单因素影响的维修等级模糊综合评定矩阵

$$\tilde{R}_{U_1} = [r_{ij}]_{5 \times 4} \quad (3-5)$$

式中: r_{ij} ——结构在役现状为 i 级需要进行 j 级维修的隶属度,由专家经验确定。结构在役现状的维修等级评定矩阵建议按表 B.1 取值。

表 B.1 结构在役现状的维修等级评定矩阵

在役状况	维修等级			
	A 级维修	B 级维修	C 级维修	D 级维修
很好	1.0	0.0	0.0	0.0

较好	0.6	0.4	0.0	0.0
中等	0.1	0.4	0.5	0.0
较差	0.0	0.3	0.5	0.2
很差	0.0	0.0	0.4	0.6

根据结构在役现状决定的结构维修模糊等级为

$$\mu_{U_1} = \{\mu_{U_1}, \mu_{U_2}, \mu_{U_3}, \mu_{U_4}\}_{U_1} = \mu_{U_1} \times \tilde{R}_{U_1} \quad (3-6)$$

(4)结构构件可靠度影响维修等级单因素模糊决策评定

构件可靠度状况划分为以下五个等级:

$$\{U_2 : \text{构件可靠度}\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{\text{很好, 较好, 中等, 较差, 很差}\} \quad (3-7)$$

结合平台结构维修决策的维修等级定义和平台构件安全评估等级划分标准, 确定构件可靠度对于不同等级的隶属度函数。根据该隶属度函数根据在役平台结构构件计算的可靠度, 可确定结构构件可靠度状况的隶属度向量(满足归一化条件):

$$\mu_{U_2} = \{\mu_{u_1}, \mu_{u_2}, \mu_{u_3}, \mu_{u_4}, \mu_{u_5}\} \quad (3-8)$$

结构构件可靠度单因素影响的维修等级模糊综合评定矩阵

$$\tilde{R}_{U_2} = [r_{ij}]_{5 \times 4} \quad (3-9)$$

式中: r_{ij} ——结构构件可靠度为 i 级需要进行 j 级维修的隶属度, 由专家经验确定。

结构构件可靠度的维修等级评定矩阵建议按表 B.2 取值。

表 B.2 构件可靠度的维修等级评定矩阵

在役状况	维修等级			
	A 级维修	B 级维修	C 级维修	D 级维修
很好	1.0	0.0	0.0	0.0
较好	0.4	0.6	0.0	0.0
中等	0.0	0.4	0.6	0.0
较差	0.0	0.2	0.6	0.2
很差	0.0	0.0	0.4	0.6

构件的可靠度状况决定的结构维修的模糊等级为

$$\mu_{U_2} = \mu_{U_2} \times \tilde{R}_{U_2} \quad (3-10)$$

(5)结构构件可靠度影响维修等级单因素模糊决策评定

结构体系可靠度状况划分为以下五个等级:

$$\{U_3 : \text{体系可靠度状况}\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{\text{很好, 较好, 中等, 较差, 很差}\} \quad (3-11)$$

结构体系可靠度状况等级的隶属度应充分考虑结构体系可靠指标的具体值, 同时还应考虑体系可靠指标的衰减速率综合确定。结合平台结构维修决策的维修等级定义和平台结构安全评估等级划分标准, 确定结构可靠度对于不同等级的隶属度函数。考虑结构体系可靠度指标衰减速率对结构体系可靠度状况等级影响的模糊等级的取值情况, 确定结构体系可靠度指标衰减速率对应按结构体系可靠度衰减速率划分的五个不同等级 {很好, 较好, 中等, 较差, 很差} 的隶属度函数。则可根据在役结构体系可靠度指标及其衰减率, 确定结构体系可靠度状况和其衰减率状况的隶属度向量(满足归一化条件)

$$\left. \begin{aligned} \mu_{U_3\beta} &= \{\mu_{\beta_{u_1}}, \mu_{\beta_{u_2}}, \mu_{\beta_{u_3}}, \mu_{\beta_{u_4}}, \mu_{\beta_{u_5}}\} \\ \mu_{U_3\alpha} &= \{\mu_{\alpha_{u_1}}, \mu_{\alpha_{u_2}}, \mu_{\alpha_{u_3}}, \mu_{\alpha_{u_4}}, \mu_{\alpha_{u_5}}\} \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

则同时考虑结构体系可靠度状况及其衰减率的隶属度向量为

$$\mu_{U_3} = \frac{1}{2}(\mu_{U_3\beta} + \mu_{U_3\alpha}) \quad (3-13)$$

结构体系可靠度单因素影响的维修等级模糊综合评定矩阵

$$\tilde{R}_{U_3} = [r_{ij}]_{5 \times 4} \quad (3-14)$$

式中： r_{ij} ——结构体系可靠度为*i*级需要进行*j*级维修的隶属度，由专家经验确定。结构体系可靠度的维修等级评定矩阵建议按表 B.3 取值。

表 B.3 结构体系可靠度的维修等级评定矩阵

在役状况	维修等级			
	A 级维修	B 级维修	C 级维修	D 级维修
很好	0.8	0.2	0.0	0.0
较好	0.3	0.7	0.0	0.0
中等	0.0	0.3	0.7	0.0
较差	0.0	0.0	0.7	0.3
很差	0.0	0.0	0.0	1.0

结构体系可靠度状况及其衰减率决定的结构维修的模糊等级为

$$\mu_{V_{U_3}} = \mu_{U_3} \times \tilde{R}_{U_3} \quad (3-15)$$

(6)确定式(1)各因素的权重系数，记为

$$W = \{w_1, w_2, w_3\} \quad (\text{归一化}) \quad (3-16)$$

建议 $W = \{0.15, 0.25, 0.6\}$ ；

(7)利用单因素评定结果，将 $\mu_{V_{U_1}}$ 、 $\mu_{V_{U_2}}$ 和 $\mu_{V_{U_3}}$ 分别归一化，形成综合决策矩阵：

$$\tilde{R}_U = [\mu_{V_{U_1}}, \mu_{V_{U_2}}, \mu_{V_{U_3}}]^T = [r_{ij}]_{3 \times 4} \quad (3-17)$$

(8)按以下模糊综合决策方法确定模糊维修等级：

$$\mu_V = W \times \tilde{R}_U \quad (3-18)$$

(9)按最大隶属度原则确定维修等级：

$$V = \{V_i \mid \mu_{V_i} = \max_{i=1}^4 \mu_{V_i}\} \quad (3-19)$$

B.4 平台结构缓解措施及维修建议

B.4.1 对于结构整体极限承载能力影响忽略不计的构件(对极限承载能力贡献小于 1%)及其功能作用可忽略的构件，可不采取维修措施，如水下水平面内斜向水平弦杆。

B.4.2 对于需要 C 级维修的结构构件重要构件，如果结构维修费用非常高，可考虑加强人员逃生措施和关井措施提升，减小人员伤亡和失效后果，降低结构重要性等级等缓解措施，将 C 级维修变为维护性 B 级维修，节约成本，提高经济效益。

B.4.3 对于结构极限整体承载能力影响很大的重要杆件，即使决策结果为 A 级维修，也要定期进行维护性修理，降低结构体系安全度衰减速度。