

指导性文件
GD002-2026



中 国 船 级 社

深水钻修井隔水管系统分 析技术指南

2026

2026年4月1日生效

北 京

目 录

第 1 章 通 则	- 2 -
第 1 节 一般规定	- 2 -
第 2 节 系统构成	- 2 -
第 3 节 定义和缩写	- 4 -
第 4 节 接受标准	- 6 -
第 2 章 设计基础与载荷	- 7 -
第 1 节 设计基础	- 7 -
第 2 节 设计载荷	- 7 -
第 3 章 隔水管系统响应分析	- 11 -
第 1 节 一般规定	- 11 -
第 2 节 可操作性分析	- 13 -
第 3 节 下放和回收分析	- 13 -
第 4 节 悬挂分析	- 14 -
第 5 节 漂离/驱离分析	- 15 -
第 6 节 弱点分析	- 16 -
第 7 节 反冲分析	- 16 -
第 4 章 隔水管系统疲劳分析	- 18 -
第 1 节 一般规定	- 18 -
第 2 节 波致疲劳分析	- 18 -
第 3 节 涡激振动疲劳分析	- 19 -
第 5 章 修井隔水管系统分析的特殊要求	- 22 -
第 1 节 一般规定	- 22 -
第 2 节 修井隔水管系统分析的特殊要求	- 23 -

第 1 章 通 则

第 1 节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南是关于深水钻修井隔水管系统（以下简称隔水管系统）整体分析的指导性文件。

1.1.1.2 本指南提供的推荐方法是非强制性的，但选择中国船级社（以下简称“CCS”）提供相关技术服务应接受本指南的相关要求，其他采纳本指南的行为应自行承担所有相关风险。

1.1.1.3 隔水管系统分析应符合本指南或业主规定的规范、标准的适用要求，同时还应满足当地主管机关的有关要求。

1.1.2 适用范围

1.1.2.1 本指南适用于海上油气开发中的浮式钻井平台（钻井船或半潜式钻井平台）及水下防喷器组进行钻修井作业的隔水管系统整体分析及验证，其他隔水管系统可参照执行。

1.1.2.2 本指南适用于新建隔水管系统的整体分析及验证。在役作业及重新利用的隔水管系统的分析可参照执行，并应考虑历史载荷和检测数据。

1.1.3 分析目的

1.1.3.1 隔水管系统分析通常用于预测设计条件下的整体隔水管系统力学行为，确定顶部张力要求及作业海况条件下隔水管系统的安全性。分析的目的是对隔水管系统设计进行海况适应性分析，确定作业限制等。

1.1.3.2 本指南涵盖的隔水管系统分析主要包括：

(1) 隔水管系统响应分析，包括可操作性分析、下放和回收分析、悬挂分析、漂离/驱离分析、弱点分析、反冲分析等；

(2) 隔水管系统疲劳分析，包括波致疲劳分析、涡激振动疲劳分析等；

(3) 其他必要分析。

1.1.3.3 隔水管系统整体分析应考虑工程实际工况和业主的作业需求。

1.1.4 等效与免除

1.1.4.1 对于与本指南（包括接受标准）不一致的要求，如以书面文件证明其至少与本指南要求具有同等的安全水平，并经 CCS 同意，可接受以替代本指南的相应要求。

1.1.4.2 对于具有新功能、新特性和新颖结构形式的隔水管系统，如应用本指南的任何规定可能严重妨碍其安全使用时，经 CCS 同意，可免除该规定。

1.1.5 风险评估的应用

1.1.5.1 如果隔水管系统或设备的所有者或其代理人对其进行风险评估，经 CCS 对其风险评估文件进行审核认为满意后，则风险评估中采用的风险控制方案及措施可代替本指南的全部或部分规定。

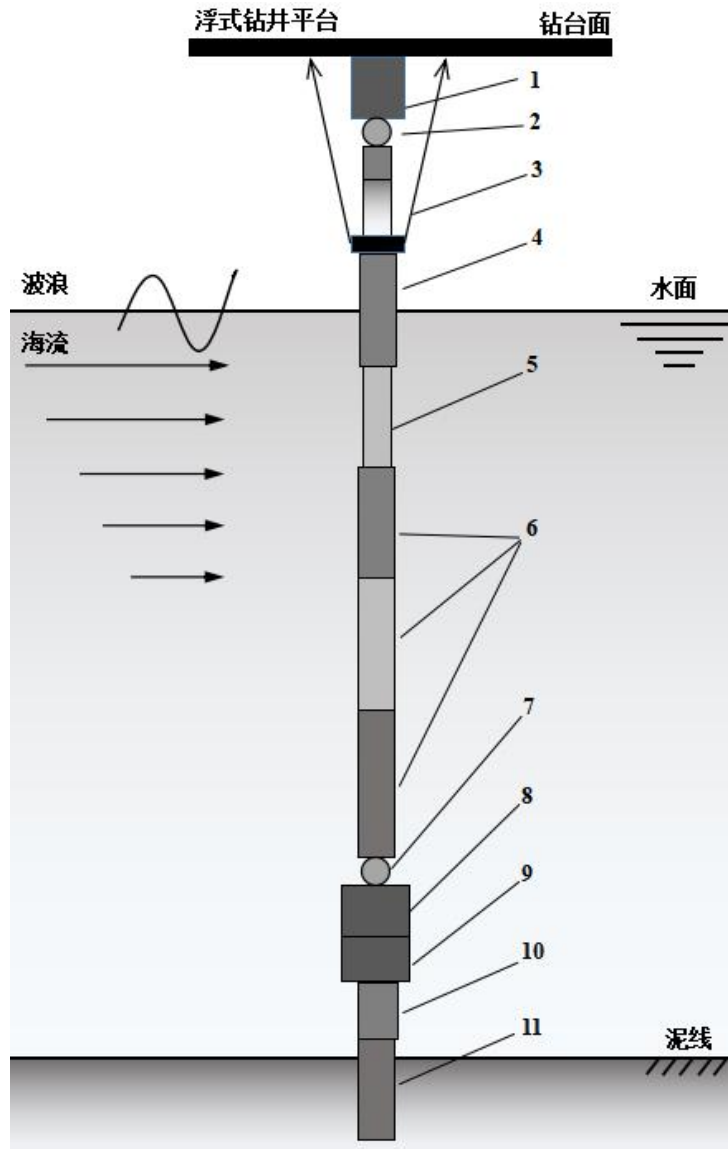
第 2 节 系统构成

1.2.1 钻井隔水管系统构成

1.2.1.1 深水钻井隔水管及相关部件宜作为一个系统整体考虑，典型的钻井隔水管系统

应包括如下部分，详见图 1.2.1.1。

- (1) 张紧器；
- (2) 伸缩节；
- (3) 上部挠性接头和下部挠性接头；
- (4) 隔水管单根，包括裸单根、浮力单根；
- (5) 隔水管下部总成/防喷器组；
- (6) 导管、套管。



1-分流器；2-上部挠性接头；3-张紧器；4-伸缩节；5-隔水管裸单根；6-隔水管浮力单根；7-下部挠性接头；8-隔水管下部总成；9-防喷器组；10-井口；11-导管。

图 1.2.1.1 钻井隔水管系统构成示意图

1.2.2 钻井隔水管系统功能

1.2.2.1 钻井隔水管系统的主要功能是为浮式钻井平台与井口之间提供流体流动的通道，为节流管路、压井管路和其他与水下设备相连的管路提供支承，为钻井工具进入井内提供导向，为防喷器的下放和回收提供服务。主要功能如下：

- (1) 为浮式钻井平台、BOP 组提供流体通道；
 - ① 钻井作业时钻井液通过隔水管主管内孔返回浮式钻井平台；
 - ② 通过节流和压井管线、BOP 组控制井压；
 - ③ 流体提供液压管线、钻井液增压管线等辅助管线完成作业要求。

- (2) 引导钻完井工具进入井内；
- (3) 下放和回收 BOP 组。

1.2.3 作业模式

1.2.3.1 钻井隔水管系统在海洋钻井作业中存在四种作业模式：

(1) 钻井模式：在此模式下可正常开展钻井活动，包括钻进、起下钻、井下扩眼、钻井液循环等。特殊钻井作业，如下套管、固井或试井，可能会有更严格的作业极限，应予以特殊考虑。

(2) 连接非钻井模式：在此模式下，仅能开展钻井液循环和起钻杆作业。钻杆不能旋转。

(3) 断开模式：如果环境条件超过连接非钻井模式的安全操作限制，应解脱隔水管，避免损坏水面和水下设备。使用隔水管悬挂下部隔水管总成或整个防喷器组。

(4) 起下隔水管模式：下放或回收隔水管和防喷器组/下部隔水管总成的断开模式。由于隔水管动态行为对其长度敏感，在起下隔水管作业期间，应考虑全深度下放和多个部分深度下放。

第3节 定义和缩写

1.3.1 定义

1.3.1.1 除另有规定外，下列名词术语的定义适用于本指南：

(1) 隔水管主管 riser pipe

系指隔水管单根的主要组成管道，通常为无缝钢管或电焊钢管，是钻柱的导向管道和井内返出流体的通道。

(2) 辅助管线 auxiliary line

系指安装在钻井隔水管主管侧面，除节流和压井管路之外的管路，例如液压输送管路、浮筒控制管路，泥浆增压管路等。

(3) 隔水管单根 riser joint

系指两端分别配置有内、外接头（公、母接头）的隔水管，通常包括隔水管主管、节流和压井管线、辅助管线及其支架等。

(4) 浮力块 buoyancy module

系指隔水管单根安装的减少其水下重量，从而减少隔水管顶部张力要求的装置。

(5) 止推环 buoyancy module

系指把浮力块浮力传给隔水管单根的装置。

(6) 隔水管浮力单根 riser buoyancy joint

系指由隔水管主管及其两端母接头和公接头、节流和压井管线、辅助管线及其支架组成的隔水管。

(7) 张紧器 tensioner

系指提供和保持隔水管管柱顶部张力，以防止屈曲的装置，张紧器一端与隔水管伸缩节外筒相连，一端与平台相连。

(8) 张紧环 tension ring

系指连接隔水管伸缩节和张紧器的装置。

(9) 挠性接头 flex joint

系指由外壳体和连接法兰、内球铰结构、轴承与润滑系统等主要部件组成，实现隔水管串与防喷器、浮式钻井平台的柔性连接的装置。

(10) 伸缩节 telescopic joint

系指带有内筒和外筒及其之间具有密封机构的隔水管单根，主要功能是适应隔水管柱随平台升沉或横向移动发生长度变化，当平台运动时，通过伸缩装置内筒与外筒之间的相对移动以补偿隔水管管柱的长度。

(11) 灌注阀 fill-up valve

系指带有阀体装置的特殊隔水管单根,为了防止极端工况下,隔水管内部液面下降导致的管体挤毁,灌注阀通过压差传感器控制可以自动打开连通海水和隔水管内部。

(12) 短节 pup joint

系指比标准长度隔水管单根短的隔水管单根,主要用于隔水管系统的配长。

(13) 防反冲系统 anti-recoil system

系指当隔水管解脱时,限制隔水管向上加速的装置。

(14) 隔水管连接器 riser connector

系指将隔水管下部总成与下部防喷器组的顶部连接的液压连接器。

(15) 隔水管下部总成 lower marine riser package

系指构成防喷器组的一个部分,通常包括隔水管下部总成连接器、一个或多个环形防喷器、下部挠性接头、隔水管适配器和多路控制盒。

(16) 修井隔水管下部总成 lower workover riser package

系指隔水管管柱最下部的设备总成,为水下采油树安装/修井配置,包括隔水管应力短节和采油树之间的部分,一般包括隔水管下部总成和紧急脱离总成。下部修井隔水管总成允许进行井控,并确保进行连续油管、钢丝和修井作业时的安全作业状态。

(17) 隔水管解脱 riser disconnection

系指通过解锁隔水管连接器,将防喷器组与隔水管、隔水管下部总成分离。

(18) 应力集中系数 stress concentration factor

系指峰值应力和不考虑应力集中时的应力(即名义应力)的比值,它反映了应力集中程度。

(19) 涡激振动 vortex induced vibration

系指隔水管在周期性脱涡激起的流动中的顺向摇荡和侧向振荡。

(20) 响应幅值算子 response amplitude operator

系指(规则波)浮式钻井平台运动与波周期范围内出现的并引起该运动的波幅的比率。

(21) 漂离 drift-off

系指 DP 的浮式钻井平台非预期地侧向离开其相对于井口装置的预期位置,通常是由于定位系统或推进器失效而引起。

(22) 驱离 drive-off

系指 DP 的浮式钻井平台通过主推进器或定位推进器驱动而非预期地移位。

(23) 整体分析 global analysis

系指利用梁单元对从海底(井口)到上部球接头/挠性接头(包括张紧器连接)的整个隔水管管柱的分析。

1.3.2 缩写

1.3.2.1 除另有规定外,本指南采用的缩写如下:

缩写	全称	含义
API	American Petroleum Institute	美国石油学会
BOP	blowout preventer	防喷器
DP	dynamic positioning	动力定位
DTL	dynamic tension limit	动态张力极限
LFJ	lower flex joint	下部挠性接头
LMRP	lower marine riser package	钻井隔水管下部总成
LWRP	lower workover riser package	修井隔水管下部总成
RAO	response amplitude operator	响应幅值算子
SCF	stress concentration factor	应力集中系数
TJ	telescopic joint	伸缩节
UFJ	upper flex joint	上部挠性接头
VIV	vortex induced vibration	涡激振动

第4节 接受标准

1.4.1 一般要求

1.4.1.1 除满足本指南要求外，对于隔水管系统的整体分析，CCS 认可国际标准、国家标准和行业标准的适用部分。当接受标准与本指南要求存在不一致时，应以本指南要求为准。

1.4.1.2 如采用其它标准替代本指南所列承认的标准时，则应证明该替代标准与承认的标准具有同等的安全水准，并经 CCS 评估和同意后方可使用。主管机关如有相关要求，应以主管机关要求为准。

1.4.1.3 任何与接受标准之间的不一致，以及对接受标准要求的免除及更改均应在送审文件中予以说明，并经业主和 CCS 同意。

1.4.1.4 接受标准中的条款通过本指南的引用将成为本指南的条款。凡是未注明日期的接受标准，其最新版本适用于本指南。

1.4.2 接受标准

1.4.2.1 如下标准为本指南接受的主要标准，其中不注日期的标准，其最新版本适用于本指南。

(1) GB/T 30217.1 石油天然气工业 钻井和采油设备 第1部分：海洋钻井隔水管设备的设计和操作系统；

(2) GB/T 30217.2 石油天然气工业 钻井和采油设备 第2部分：深水钻井隔水管的分析方法、操作和完整性；

(3) GB/T 21412.7 石油天然气工业 水下生产系统的设计与操作 第7部分：完井或修井隔水管系统；

(4) SY/T 6913 石油天然气钻采设备 海洋钻井隔水管设备规范；

(5) ISO 13624-1 Petroleum and natural gas industries — Drilling and production equipment — Part 1: Design and operation of marine drilling riser equipment 石油天然气工业 钻井和采油设备 第1部分：海洋钻井隔水管设备的设计和操作系统；

(6) ISO 13624-2 Petroleum and natural gas industries — Drilling and production equipment — Part 2: Deepwater drilling riser methodologies, operations, and integrity technical report 石油天然气工业 钻井和采油设备 第2部分：深水钻井隔水管的分析方法、操作和完整性；

(7) ISO 13628-7 Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems — Part 7: Completion/workover riser systems 石油天然气工业 水下生产系统的设计与操作 第7部分：完井或修井隔水管系统。

第2章 设计基础与载荷

第1节 设计基础

2.1.1 设计基础数据

2.1.1.1 在整体分析前，应明确但不限于以下关键信息：

- (1) 专有名词的缩写与定义；
- (2) 参考规范标准及其版本；
- (3) 分析准则及校核准则。

2.1.1.2 作为后续分析的输入，设计参数应取自经第三方审查的设计规格书、设备图纸及计算报告等。设计参数应包含如下内容：

- (1) 环境条件
 - ① 作业位置及水深；
 - ② 极端作业环境下海水流速、浪高及周期；
 - ③ 海冰（如有）；
 - ④ 海生物（如有）；
 - ⑤ 土壤数据。
- (2) 水动力参数
- (3) 压力、温度
- (4) 浮式钻井平台参数
 - ① 静态参数，如平台与井口及月池相关的关键几何位置和尺寸、中心参数等；
 - ② 动态参数，如运动响应幅值、浪向、响应、漂移系数等。
- (5) 隔水管系统关键设备参数，应包含如下设备的尺寸、重量等参数：
 - ① 万向节；
 - ② 分流器；
 - ③ 伸缩节；
 - ④ 张紧器；
 - ⑤ 隔水管单根，裸单根、浮力单根；
 - ⑥ 隔水管接头及辅助管线；
 - ⑦ 灌注阀；
 - ⑧ 挠性接头/球接头；
 - ⑨ 卡盘。
- (6) LMRP/BOP 组参数（包括 BOP 反向承压值）
- (7) 水下井口参数
- (8) 导管与套管参数
- (9) 钻井液参数

第2节 设计载荷

2.2.1 载荷分类

2.2.1.1 隔水管系统所受载荷可分为环境载荷、压力载荷和功能载荷等。

2.2.1.2 环境载荷是指直接或者间接施加在隔水管系统上的海洋环境中的载荷。环境载荷一般包括：

- (1) 波浪载荷；
- (2) 海流载荷；
- (3) 内波载荷和其它效应（若有，应特殊考虑）；

- (4) 冰载荷（若有，应特殊考虑）；
 (5) 浮式钻井平台运动载荷，叠加端部约束含张紧系统引起的运动响应。

2.2.1.3 压力载荷一般包括内压、外部静水压力及水位变化。

2.2.1.4 功能载荷为由隔水管系统自身物理属性的载荷和隔水管系统操作产生的载荷，不包括环境载荷或偶然载荷。功能载荷一般包括：

- (1) 隔水管单根、介质、附属部件等重量和浮力；
 (2) 隔水管系统顶部张力；
 (3) 温度载荷；
 (4) 井口/海床作用传递载荷；
 (5) 安装载荷等。

2.2.2 平台运动载荷

2.2.2.1 由浮式钻井平台运动引起的载荷计算应符合 CCS《海上移动平台入级规范》的相关要求。

2.2.3 波流载荷

2.2.3.1 隔水管所受的波浪力和海流力为单位长度隔水管上的波流联合作用力，可用莫里逊（Morison）公式表示为：

$$F = F_D + F_I \quad \text{kN/m}$$

$$F_D = 1/2 \rho_w C_D A |u - \dot{x}|(u - \dot{x}) \quad \text{kN/m}$$

$$F_I = \rho_w C_A V (\dot{u} - \ddot{x}) + \rho_w V \dot{u} = \rho_w V (C_M \dot{u} - C_A \ddot{x}) \quad \text{kN/m}$$

式中： F ——隔水管垂直于其轴线方向单位长度上的波浪力；

F_D ——单位长度上的拖曳力；

F_I ——单位长度上的惯性力；

ρ_w ——海水密度， t/m^3 ；

A ——单位长度隔水管在垂直于矢量 $(u - \dot{x})$ 方向上的投影面积， m^2/m ；

C_D ——拖曳力系数；

C_A ——附加质量系数；

C_M ——惯性力系数， $C_M = C_A + 1$ ；

V ——单位长度隔水管的体积， m^3/m ；

u ——垂直于隔水管轴线水质点速度分量， m/s ；当海流与波浪联合作用时， u 为波浪水质点的速度矢量与海流速度矢量之和在垂直于隔水管方向上的分量；

\dot{u} ——垂直于隔水管轴线水质点加速度分量， m/s^2 ；

\dot{x} ——垂直于隔水管轴线速度分量， m/s ；

\ddot{x} ——垂直于隔水管轴线加速度分量， m/s^2 。

2.2.3.2 目前主要通过线性波浪理论和非线性波浪理论获得流体质点的速度和加速度。

2.2.3.3 根据波周期、波高及水深，选择适用的流函数理论、Stokes 波理论或线性波理论计算二维规则波浪运动。多数情况下，Stokes 五阶波理论能够提供可接受的准确性。

2.2.3.4 采用莫里逊（Morison）公式计算隔水管承受的波浪力需要选择合适的波浪理论以及对应的拖曳力系数 C_D 和惯性力系数 C_M ，系数的取值范围见表 2.2.3.4，必要时，应通过试验获取。

拖曳力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 的取值 表 2.2.3.4

雷诺数范围	浮力单根（基于浮力块直径）		裸单根（基于主管管径）	
	C_D	C_M	C_D	C_M
$Re \leq 10^5$	1.2	1.5~2.0	1.2~2.0	1.5~2.0
$10^5 < Re \leq 10^6$	0.6~1.2	1.5~2.0	1.0~2.0	1.5~2.0
$Re \geq 10^6$	0.6~0.8	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0

2.2.3.5 雷诺数计算公式如下所示：

$$R_e = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{U D}{\nu}$$

式中： ρ ——流体密度， kg/m^3 ；

U ——流体速度， m/s ；

D ——结构的特征长度，即隔水管外径， m ；

μ ——流体的动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

ν ——流体的运动黏度， m^2/s ，一般取 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。

2.2.3.6 在计算裸单根水动力系数时，应包含节流管线、压井管线和液压管线的影响，得出等效水动力外径。对于浮力单根，应使用浮力单根外径计算拖曳和惯性直径。可采用“等效体积法”或“等效直径法”计算水动力外径。“等效体积法”即将隔水管主管和附属管线的体积相加，然后计算与此体积相等的圆柱体的直径，作为等效水动力外径。“等效直径法”即将隔水管主管直径和附属管线直径进行简单相加得到的直径作为等效水动力外径。

2.2.3.7 如浮力单根的水动力系数选取对隔水管系统整体分析影响较大，应充分考虑浮力块的覆盖率、表面粗糙度、几何形状及其沿隔水管轴向的分布情况，基于浮力块的外径进行选择。必要时应通过试验确定或采用经试验验证的数值。

2.2.3.8 BOP、LMRP 等隔水管系统中设备的水动力系数选取应予以特殊考虑，必要时需通过试验获取。

2.2.4 顶部张力

2.2.4.1 顶部张力设置应确保即使有部分张紧器失效，也能保证隔水管底部会产生有效张力。应考虑三个顶部张力要求，包括最小顶部张力，动态张力极限和最大顶部张力。

(1) 最小顶部张力 (T_{\min}) 是在张紧器或张紧器组突然失去压力时防止隔水管全局屈曲所需的最小顶部张力；

(2) 动态张力极限 (F_{DTL}) 是张紧器可以安全产生的最高动态张力。 F_{DTL} 的确定应考虑每个张紧器及其支撑结构的压力和结构极限以及由单元偏移和波浪引起的运动引起的任何张紧器中的张力振荡；

(3) 最大顶部张力：张紧器中间行程中允许的最大张力设置。应考虑足够的余量，以便任何预期的条件（例如波浪引起的浮式平台运动，偏移和/或潮汐变化）不会导致任何张紧器中的张力超过 F_{DTL} 。

2.2.4.2 理论算法是隔水管顶部张力的基础方法，主要根据隔水管水下重量和考虑张紧器失效计算隔水管所需张紧力。

2.2.4.3 对于典型的钢丝绳张紧器系统，由于张紧器的失效而导致张力突然损失，其最小顶部张力 T_{\min} 由下式计算：

$$T_{\min} = \frac{T_{SR\min} N}{R_f (N - n)} \quad \text{kN}$$

式中： T_{\min} ——最小顶部张力， kN ；

$T_{SR\min}$ ——最小支撑环张力， kN ；

R_f ——张力降低系数。在钻井和非钻井模式下，通常取 0.90~0.95；

N ——隔水管张紧器总数；

n ——故障失效的张紧器数量。

$$T_{SR\min} = W_{riser} f_{wt} - B_n f_{bt} + A_i (\rho_m H_m - \rho_w H_w) \quad \text{kN}$$

式中： W_{riser} ——LMRP 之上的水下隔水管的重量， kN ；

f_{wt} ——水下重量容差系数，通常取 1.05；

B_n ——LMRP 之上浮力块的净浮力， kN ；

f_{bt} ——因弹性压缩、长期吸水及制造误差引起的浮力损失系数，通常取 0.96；

A_i ——隔水管的内部横截面积，包括节流、压井和其他辅助管线， m^2 ；

ρ_m ——钻井液密度， kg/m^3 ；

H_m ——至 LMRP 底部的钻井液柱高度， m ；

ρ_w ——海水密度, kg/m^3 ;

H_w ——至 LMRP 底部的海水柱高度, m 。

2.2.4.4 对于典型的直接作用式张紧器系统,张紧器杆侧所有压力的突然损失会在张紧环上产生向下的作用力。为了抵抗作用在活塞无杆腔的压力以及活塞、杆和由失效张紧器支撑的张紧环部分的重量,最小顶部张力 T_{\min} 由下式计算:

$$T_{\min} = \frac{N}{R_f(N-n)} \cdot \left(T_{SR\min} + nW_{\text{piston/rod}} + \frac{nW_{\text{Ring}}}{N} + nF_{Bsp} \right) \quad \text{kN}$$

式中: N ——隔水管张紧器总数;

n ——故障失效的张紧器数量;

$W_{\text{piston/Rod}}$ ——失效张紧器活塞和连杆的重量, kN ;

$\frac{W_{\text{Ring}}}{N}$ ——故障张紧器支撑的张紧环部分的重量, kN ;

F_{Bsp} ——作用液压缸无杆腔压力产生的力, kN 。

2.2.4.5 基于残余张力的顶部张力计算方法,即保证隔水管下部挠性接头处的残余张力应大于 LMRP 的水下重量,以确保恶劣海况条件下启动紧急解脱程序时能够安全提升整个隔水管系统,此时隔水管系统的顶部张力 T_{top} 由下式计算:

$$T_{\text{top}} = \sum_{\text{top}}^{\text{bottom}} (W_{\text{riser}} + W_{\text{mud}}) + R_{TB} \quad \text{kN}$$

式中: W_{riser} ——LMRP 之上的水下隔水管的重量, kN ;

W_{mud} ——隔水管柱 LMRP (含) 以上,管柱内部钻井液的重量, kN ;

R_{TB} ——隔水管底部残余张力, kN , 推荐选取 222.411 kN (50 kips)、444.822 kN (100 kips) 等。

第3章 隔水管系统响应分析

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 隔水管系统的设计和顶部张力设置，应能保证隔水管系统设计服役环境中，在本指南第2章第2节中各种载荷作用下安全完成钻井作业。

3.1.1.2 应通过整体响应分析对钻井隔水管系统的设计进行验证，确认系统各部件满足设计准则要求和功能要求。

3.1.1.3 隔水管系统的整体响应分析是对隔水管可操作性分析、下放和回收分析、悬挂分析提出相关技术要求，必要时需要进行漂离/驱离分析、反冲分析、弱点分析、疲劳分析等。隔水管系统的整体响应应满足不同工况下的设计准则要求。

3.1.1.4 隔水管系统的整体响应分析在各工况下的对应关系见表3.1.1.4。

隔水管系统整体分析项目与各工况的对应关系

表3.1.1.4

分析项目	钻井模式	连接非钻井模式	断开模式	起下隔水管模式
可操作性分析	√	√	-	-
下放和回收分析	-	-	√	√
悬挂分析	-	-	√	√
漂离/驱离分析	*	*	-	-
反冲分析	*	*	*	-
弱点分析	*	*	-	*
疲劳分析	*	*	*	*
“√”表示适用。 “-”表示不适用。 “*”表示可选。				

3.1.2 分析模型

3.1.2.1 隔水管系统的整体分析模型应能准确模拟隔水管系统内的各部件，明确浮式钻井平台的结构尺寸和运动参数信息，可采用耦合或解耦的方式进行建模。

3.1.2.2 在整体分析模型中，钻井隔水管系统通常简化为在整个长度上承受张力载荷的“梁”，“梁”两端应根据实际情况设置适当的边界条件。

3.1.2.3 “梁”本身应能准确反映隔水管几何形状、重量和材料属性。应根据具体模型确定适当的单元长度，对于载荷和几何形状沿轴向快速变化的位置，如上部波浪区、下部挠性/球形接头附近、中间挠性/球形接头（如有时），应适当缩小单元长度。

3.1.2.4 考虑到钻井液柱对隔水管系统分析影响较大，分析前应明确钻井液密度范围。

3.1.2.5 分析中使用的重量等于整个管节的重量，包括主管、接头、锁紧结构、节流/压井和辅助管线、管卡、多路复用（MUX）管线、浮力块、止推环等。

3.1.2.6 应明确隔水管分析的环境条件，包括具有不同水深的流速和不同方向的海流剖面及波高、峰值周期、波谱等相关参数。

3.1.2.7 模型中顶部边界条件通常包括顶部张力、平台运动响应，也包括上部挠性/球形接头的旋转刚度，在不同作业模式下可能发生变化。

3.1.2.8 模型中浮式钻井平台偏移应与定位系统（系泊系统或DP系统）能力一致。

3.1.2.9 模型中底部边界条件根据连接或解脱状态确定。在连接状态下，模型可能以井口为端点，也可能延伸至泥线以下井口并包括导管、套管。非连接状态下模型底部可能包括整个BOP组或仅包括LMRP，应具体考虑。

3.1.2.10 在起下隔水管和解脱场景中，当水深较大时隔水管轴向的动态响应可能非常

显著，且隔水管的动态行为对管柱长度十分敏感，应考虑全深度下放和多个部分深度下放。隔水管下放、回收和解脱时，应明确隔水管的水动力性能，以捕捉隔水管在横向和轴向的动态响应。由于平台垂荡，张紧器、隔水管柱和 BOP 组/LMRP 可能会受到轴向共振激励。

3.1.2.11 隔水管系统的分析应使用经过验证的、适用于海洋工程结构物动力分析的专用软件。

3.1.3 分析准则

3.1.3.1 连接状态下的隔水管系统分析准则见表 3.1.3.1。

连接状态下隔水管系统分析准则要求 表 3.1.3.1

设计参数	操作工况		极限工况 ¹
	钻井	连接非钻井	
变形准则²			
上部挠性接头/球接头平均转角(°)	2	-	-
上部挠性接头/球接头最大转角(°)	4	90%可用	90%可用
下部挠性接头平均转角(°)	2	-	-
下部挠性接头最大转角(°)	4	90%可用	-
应力准则			
隔水管等效应力/屈服应力	0.67	0.67	0.67
井口弯矩等效应力/极限弯矩	0.67	0.8	1.0
导管等效应力/屈服应力	0.67	0.8	1.0
伸缩节冲程长度³(m)	最大许用冲程	最大许用冲程	最大许用冲程
¹ 极限工况是指隔水管、井口、导管系统达到其强度与稳定极限，准备并随时启动 BOP 与 LMRP 紧急脱离程序的状态。			
² 在磨损风险增加、挠性接头/球接头内或附近存在大外径部件等情况下，宜对挠性接头/球接头的平均转角和最大转角进行更严格的限制。			
³ 根据平台的参数确定表中伸缩节冲程长度的数值。			

3.1.3.2 安装作业状态下的隔水管系统分析准则见表 3.1.3.2。

安装作业状态下隔水管系统分析准则要求 表 3.1.3.2

设计参数	安装作业工况 ¹
变形准则	
下部挠性接头最大转角(°)	90%可用
应力准则	
隔水管等效应力/屈服应力	0.67
隔水管张力/最大许用张力	1.0
平台月池尺寸²(m)	平台月池尺寸
¹ 安装作业工况包括正常的安装作业工况和非作业工况即隔水管及其他设备达到强度及工作极限，准备随时停工或采取其他安全防范措施的状态。	
² 根据平台的参数确定表中平台月池尺寸的数值。	

3.1.3.3 悬挂作业状态下的隔水管系统分析准则见表 3.1.3.3。

悬挂状态下隔水管系统分析准则要求 表 3.1.3.3

设计参数	硬悬挂模式 ¹	软悬挂模式 ²
变形准则		
上部挠性接头最大转角(°)	-	90%可用
下部挠性接头最大转角(°)	90%可用	90%可用
应力准则		
隔水管等效应力/屈服应力	0.67	0.67
隔水管张力/最大许用张力	1.0	1.0
伸缩节冲程长度³(m)	-	最大许用冲程
平台月池尺寸³(m)	平台月池尺寸	平台月池尺寸
¹ 硬悬挂模式：拆除张紧器并锁定伸缩节，使隔水管系统与卡盘刚性连接，直接悬挂在隔水管卡盘上。		
² 软悬挂模式：通过具有补偿能力的张紧器、钻柱补偿器、或者专门的软悬挂装置悬挂。		
³ 根据平台的参数确定表中伸缩节冲程长度、平台月池尺寸的数值。		

第2节 可操作性分析

3.2.1 一般要求

3.2.1.1 可操作性分析的目的是为不同的钻井液密度确定操作范围，定义钻井模式或连接非钻井模式下所需的顶部张力和允许偏移范围。

3.2.1.2 应分析隔水管的顶部张力，保持 LMRP 与 BOP 之间的连接器处于过提受拉状态。通过保持适当的隔水管张力，可获得最佳隔水管工作状态，并避免隔水管损伤。

3.2.1.3 应分析隔水管的允许偏移，确定浮式钻井平台的“警戒圈”边界（通常是平台偏移和海流的红黄绿圈图）。

3.2.2 分析要求

3.2.2.1 隔水管张力与钻井液密度关系的分析中需要输入的信息包括：张力范围、隔水管设计参数、隔水管浮力、水深和预期的环境参数等。

3.2.2.2 在隔水管偏移的分析中需要输入的信息，除了以上内容，还应包括：浮式钻井平台位置、海流载荷和波浪载荷的复合冲击、隔水管两端的连接模式（软悬挂和硬悬挂模式）等。

3.2.2.3 如油井和土壤约束参数对分析结果有显著影响，宜对其进行建模分析。

3.2.2.4 所建模型应能验证预期环境条件和钻井液密度与顶部张紧力的关系、在特定现场条件下推荐的最大和最小顶部张力以及隔水管张力与钻井液密度操作范围。

3.2.2.5 在建模中，宜注意停止钻井、回收隔水管的环境条件以及其他特殊条件的影响。

3.2.2.6 隔水管可操作性分析可以采用频域或时域的分析方法。在时域模拟时，可以使用不规则波方法。

3.2.3 分析结果评估

3.2.3.1 在仿真计算完成后，应对挠性/球接头角度、应力、有效张力、连接器弯矩、张紧器和伸缩节行程等方面进行评估。

3.2.3.2 在评估顶部张力时，应注意以下事项：

(1) 顶部张力的主要决定因素，包括隔水管配置情况和钻井液密度。顶部张力可用隔水管总拉力、张紧器液压系统上的压力、张力计读数或其他参数指示。

- (a) 最大顶部张力不大于张力器最大额定张力的 90%；
- (b) 最小顶部张力应满足本指南第 2 章第 2 节的相关要求；
- (c) 宜确保隔水管有效张力总是正的。

(2) 应验证隔水管顶部张力与钻井液密度的关系函数。

3.2.3.3 在验证有效球/挠性接头角度时，应注意以下事项：

(1) 验证挠性/球接头角度，宜从偏角、磨损和法向力三个方面开展分析；

(a) 在偏角方面，挠性接头偏角与隔水管、井口、导管的角度相关。

(b) 在磨损和法向力方面：挠性接头和水下设备上钻柱的磨损主要取决于挠性接头偏角和挠性接头处的钻柱张力。磨损率的预测应考虑法向力、钻杆接头的耐磨性、钻速、钻柱旋转速度等参数。分析中宜验证在钻柱和挠性接头之间的法向力与挠性接头处的钻柱张力的关系。

(2) 根据分析评估的结果，创建极限状态下的浮式钻井平台位置偏移图。

第3节 下放和回收分析

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 下放和回收分析是确定安全下放/回收隔水管的环境条件要求，获得隔水管从浮式钻井平台下放和回收作业阶段的力学性能，一般是在首次作业前开展。

3.3.2 分析要求

3.3.2.1 应针对隔水管下放和回收模式进行建模，模型应考虑隔水管系统下放与回收使用的各个部件。

3.3.2.2 隔水管的下放和回收分析一般包括以下模型：

(1) 波浪区模型：LMRP 和 BOP 组处在波浪区内。此时作用在 BOP 组和 LMRP 上的波浪拍击力以及水面海流拖拽力，引起隔水管的横向位移，在浮式钻井平台硬悬挂点上引起弯曲应力。

(2) 中间模型：LMRP 和 BOP 组处在海流作用引起隔水管弯矩最大时的位置。该模型可用于最大横向位移的计算，宜对照月池间隙和浮式钻井平台的浮箱间隙来核对。

(3) 井口附近模型：LMRP 和（或）BOP 组位于井口之上。应考虑隔水管裸单根数量的选择。当隔水管仅悬挂 LMRP 时，在裸单根数量最少的情况下，LMRP 增加的重量足以防止在顶部产生压缩；当隔水管悬挂 BOP 组时，应考虑裸单根最大数量时的重量不宜超过顶部张力，且顶部张力应小于平台钻机提升系统的承载能力。

3.3.2.3 因伸缩节收回并锁定，在模型中，不宜考虑伸缩节冲程。宜包括硬悬挂点相对于浮式钻井平台重心的位置，以便能适当地使用浮式钻井平台响应幅值算子 RAO。

3.3.2.4 下放和回收分析应涵盖下放和回收操作的几个阶段，至少应包括：

(1) 分流器底部的挠性接头：下放和回收时应避免分流器与隔水管接头发生碰撞，以防损坏辅助管线；

(2) 下放一半的隔水管管柱：宜考虑浮力单根和分流器外壳之间的冲击载荷；

(3) 除伸缩节外，下放全部隔水管管柱：短节或挠性接头应避免与分流器外壳碰撞，以防损坏辅助管线；

(4) 在非钻井模式下，允许更大的挠性接头角度，隔水管可以在更恶劣的环境条件下保持连接。

3.3.3 分析结果评估

3.3.3.1 应评估下放和回收期间浮力块和分流器外壳或月池之间的接触力，接触力应小于浮力块的允许冲击载荷。

3.3.3.2 应对分析结果进行后处理，评估横向偏移、角度、应力、有效张力和接触载荷等。

3.3.3.3 应对下放或回收的不同阶段、不同流速和不同波高进行分析，以确定下放和回收的允许环境载荷。

第4节 悬挂分析

3.4.1 一般要求

3.4.1.1 悬挂分析的目的是确定隔水管可悬挂而不损坏隔水管的极限环境条件，或者确定在强风暴撤离前应回收的隔水管数量。

3.4.2 分析要求

3.4.2.1 隔水管悬挂一般分为硬悬挂和软悬挂两种悬挂模式。在紧急断开或计划断开后，悬挂配置可以支持 LMRP，或者下放或回收期间支持 BOP 组。

3.4.2.2 隔水管悬挂用于有限的作业工况，而不是飓风或热带气旋。

3.4.2.3 硬悬挂的情况一般在回收分流器和上部球/挠性接头后，将隔水管悬挂在卡盘上。在时间允许的情况下，可回收顶部隔水管单根。

3.4.2.4 硬悬挂回收状态下，上部挠性接头布置在万向节下方，回收时应避免分流器与隔水管接头发生碰撞。

3.4.2.5 隔水管硬悬挂状态一般通过时域分析方法进行分析，明确隔水管在硬悬挂模式下的张力载荷和碰撞影响等。

3.4.2.6 软悬挂模式下，隔水管连接在伸缩节上，由张紧器或张紧器和升沉补偿器的组

合提供张紧力。

3.4.2.7 软悬挂模式下，伸缩节和张紧器的最大行程能够适应隔水管的动态响应。

3.4.2.8 隔水管软悬挂状态一般通过时域分析方法进行分析。

3.4.3 分析结果评估

3.4.3.1 隔水管悬挂分析宜输出隔水管顶部张力、扭转角、弯矩、位置等结果，计算结果应满足隔水管系统的设计要求。

3.4.3.2 悬挂分析结果应对隔水管系统操作提供技术支持，宜明确载荷与极限张力、应力分布等。

3.4.3.3 应分析隔水管系统与月池等设备的干涉状态，明确隔水管系统的可操作性。

3.4.3.4 宜对悬挂状态下的隔水管系统疲劳开展分析，评估隔水管系统寿命是否满足设计寿命要求。

第5节 漂离/驱离分析

3.5.1 一般要求

3.5.1.1 钻井隔水管系统的漂离/驱离分析用于确定 DP 浮式钻井平台的最大偏移限制（即“观察圈”）和验证浮式钻井平台偏移是否合适。

3.5.1.2 黄色观察圈显示应开始应急解脱准备的最大偏移。红色观察圈显示应启动应急解脱程序的最大偏移。这两种“观察圈”范围的确定应基于浮式钻井平台运动，并考虑识别和响应所需时间、应急解脱准备所需时间、完成应急解脱所需时间以及隔水管底部总成从分离到回收至允许解脱点所需时间。

3.5.2 分析要求

3.5.2.1 漂离/驱离分析应考虑以下内容：

- (1) 平台偏移和朝向随时间的变化（可能受到隔水管恢复力的影响）；
- (2) 平台在偏离位置的瞬态效应（会导致伸缩节行程增加和上部挠性接头转角变大）；
- (3) 伸缩节和张紧器冲程的不确定性；
- (4) 隔水管系统应力、载荷、角度和冲程限制；
- (5) 在某些情况下，瞬时效果受限，此时平台偏移随时间的变化可以与隔水管分析模型分开考虑。

3.5.2.2 以下情况应考虑隔水管系统的应急解脱：

- (1) 浮式钻井平台 DP 系统发生故障，浮式钻井平台可能会驶离或漂离；
- (2) 海洋环境足够恶劣，即使 DP 系统完好，当载荷超过 DP 系统能力时，浮式钻井平台也可能失去定位能力。

3.5.2.3 漂离分析模型中，浮式钻井平台通常在井口上方就位，在推进器失效情况下，承受风、浪和流作用。电力完全失效是漂离分析考虑的场景之一。

3.5.2.4 驱离分析模型中，通常假设推进器将在指定的持续时间、功率和方向上驱动平台，同时浮式钻井平台承受风、浪和流的作用。

3.5.2.5 钻井模式下，当钻柱旋转或沿着隔水管垂向移动时，应关注隔水管系统的磨损问题。

3.5.3 分析结果评估

3.5.3.1 应能通过计算确定隔水管响应的允许极限值，包括上部挠性接头角度、下部挠性接头角度、伸缩节冲程、张紧器冲程、井口和连接器弯矩、套管应力、月池间隙，也包括

作用在套管连接器、隔水管、LMRP 连接器上的载荷。

3.5.3.2 应根据隔水管响应的允许极限值确定浮式钻井平台极限位置，结合识别和响应所需时间、应急解脱准备所需时间、完成应急解脱所需时间以及隔水管底部总成从分离到回收至允许解脱点所需时间，结合浮式钻井平台在该漂离/驱离状态下的移动速度，确定适当的黄色观察圈和红色观察圈。

第6节 弱点分析

3.6.1 一般要求

3.6.1.1 弱点分析通常在钻井作业之前进行，其目的是确定在漂离/驱离或系泊系统故障导致的平台极端偏移情况下的钻井隔水管系统中的薄弱点，保证隔水管及油井的完整性。通过薄弱点分析预测的最大载荷可用于隔水管和油井系统组件的设计选型，或用于检查隔水管与现有油井系统之间的兼容性。

3.6.1.2 在进行弱点分析前，需要对隔水管系统的薄弱点进行评估，以确定是否有必要进行弱点分析。

3.6.1.3 弱点分析是在浮式钻井平台极端偏移状态下，同时承受极端的风、波、流环境条件，对隔水管系统进行分析，确定系统的薄弱点。

3.6.1.4 弱点分析通常应用于在伸缩节或张紧器完全伸出时的较大偏移状态。弱点分析的计算模型应准确定义伸缩节和张紧器的完全伸出状态。

3.6.1.5 隔水管部件接头的断裂或分离可以作为隔水管系统失效的薄弱点。在这种情况下，应考虑基于每个隔水管部件极限能力的分析。

3.6.2 分析要求

3.6.2.1 在适当的边界条件下，创建从钻台到油井导管的钻井隔水管模型，并检查隔水管柱有效张力的准确性。

3.6.2.2 将浮式钻井平台放置在一系列偏移位置，考虑风、浪、流载荷，宜采用静力分析确定隔水管系统的薄弱点。

3.6.2.3 评估球/挠性接头角度、应力、张力和弯矩，并确定偏移量和组件达到极限状态。

3.6.2.4 评估隔水管系统部件的极限承载能力。

3.6.3 分析结果评估

3.6.3.1 仿真模型的计算结果，如张力分布、等效应力分布和弯矩分布，应与理论分析结果相符。

3.6.3.2 海流作用下隔水管的上部、下部挠性接头转角最大转动角度和平均角度应符合本指南第3章 3.1.3 的分析准则要求，避免因角度过大导致的应力集中和材料损伤。

第7节 反冲分析

3.7.1 一般要求

3.7.1.1 反冲分析的目的是确定隔水管防反冲系统在紧急解脱或隔水管断裂时的相关要求。

3.7.1.2 反冲分析应涵盖下列方面：

(1) 建立初始隔水管超拉张力以及反冲机制，以便使 LMRP 能够在特定波浪条件下从防喷器组上方解脱。

(2) 建立隔水管张力以及反冲和/或防反冲机制，使连续隔水管运动不会使伸缩节、张紧器完全失效，造成沿隔水管柱轴向的负张力，或针对特定波浪状况对 BOP 组产生影响。

(3) 如有需要，为一系列环境条件建立一套反冲控制参数。

3.7.1.3 隔水管反冲分析中张紧系统的反冲和防反冲液压控制应与隔水管动态响应一起评估。

3.7.2 分析要求

3.7.2.1 针对涉及复杂的控制系统和高的超载提升力情况，反冲分析需考虑瞬时效应。

3.7.2.2 反冲分析有必要考虑最重和最轻的极限湿重，其不确定性在隔水管解脱时产生较大的性能波动。

3.7.2.3 在许多情况下，可以适当地定义反冲分析的“最大工作条件”和“最大连接条件”。“最大工作条件”是隔水管可能容纳钻井液的最恶劣的环境。“最大连接条件”是一个较恶劣的环境条件，此时隔水管仍处于连接状态，但所有钻井液已经从隔水管置换。

3.7.2.4 如果考虑反冲控制系统，需有作业原理的详细描述及分析阀门的控制算法的有效性。

3.7.2.5 一般来说，可采用线性波计算升沉运动，在较为复杂情况下需考虑浮式钻井平台的不规则升沉运动。

3.7.2.6 反冲分析需判断是否由于缺乏有效的反冲控制而发生冲击。如有，应合理准确的量化冲击载荷。

3.7.2.7 通常应尽量避免钢丝绳松弛、蹿出和挤压现象。

3.7.3 分析结果评估

3.7.3.1 隔水管反冲分析应确定是否可以进行应急解脱，输出 TJ 冲程间距、隔水管间距、防反冲控制系统设置、准则和操作极限（张力、泥浆比重和浮式钻井平台运动）等方面结果，计算结果应满足隔水管系统的设计要求。

3.7.3.2 如由于缺乏有效的反冲控制而发生冲击，应评估冲击（TJ 零冲程）载荷在撞击瞬间对其他装置的影响。

3.7.3.3 应明确在 LMRP 连接器释放后 LMRP 与 BOP 之间的距离，宜明确间距裕度和固定间距要求。

3.7.3.4 应说明浮式钻井平台在升沉周期中的位置（即“相位角”）的影响，明确其满足在应急解脱过程中的最不利情况。

第4章 隔水管系统疲劳分析

第1节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 隔水管系统疲劳分析的目的是确保隔水管系统在作业期间具有足够的疲劳寿命。

4.1.1.2 应根据不同的作业模式，建立隔水管系统的力学分析模型，开展隔水管系统力学分析，以力学分析的结果为基础，计算疲劳损伤，预测其疲劳寿命。

4.1.1.3 隔水管系统疲劳分析应综合考虑相关疲劳载荷造成的疲劳损伤，主要来自于波致疲劳和涡激振动疲劳。对于长期作业的隔水管且作业期间平台运动响应显著，还应考虑平台运动导致的疲劳损伤。

4.1.1.4 应使用公认的疲劳分析方法开展隔水管系统的疲劳分析。在工程实践中，疲劳分析通常采用两种基本方法，即 S-N 曲线法和基于断裂力学理论的断裂力学法。

4.1.1.5 在进行疲劳分析时，应基于工程经验确定疲劳寿命相对较短的疲劳危险区域，对选定的疲劳危险区域进行有限元单元细化。

4.1.1.6 S-N 曲线可参照 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》合理选取。

4.1.1.7 隔水管系统疲劳损伤计算与失效准则可参照 CCS《海上移动平台入级规范》第2篇第3章第5节及 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》第2、3、4章的相关要求。

第2节 波致疲劳分析

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 隔水管系统波致疲劳分析的目的是预测波浪载荷引起的隔水管系统疲劳损伤。

4.2.1.2 作业期间的长期波致疲劳损伤，用于计算总疲劳损伤并进行校核。

4.2.1.3 顶部和底部界面的疲劳载荷，用于顶部连接结构或海底结构的疲劳分析。

4.2.1.4 对疲劳损伤起作用的所有显著的应力范围均应予以考虑。

4.2.2 分析要求

4.2.2.1 隔水管系统波致疲劳损伤主要考虑波浪循环载荷。

4.2.2.2 波致疲劳分为短期疲劳和长期疲劳。短期疲劳为隔水管在波浪散布图中每一短期海况下的疲劳损伤。长期疲劳为考虑概率的短期疲劳的线性组合。长期疲劳分析应考虑浮体在位期间的累积疲劳损伤。

4.2.2.3 通过计算波浪散布图中每个海况下隔水管响应，获得隔水管的长期波致疲劳损伤，不同海况的疲劳损伤根据 Palmgren-Miner 线性累积方法进行累加。海况谱可采用 JONSWAP 谱或 P-M 谱。

4.2.2.4 对于不同方向的环境载荷，在隔水管横截面环向上以规则间隔取不同的位置点，以计算最关键位置的疲劳损伤。通常以隔水管截面环向各点中的最大疲劳累积损伤，作为在隔水管长度上该截面的疲劳损伤。

4.2.2.5 波致疲劳分析时应重点关注隔水管的顶部和底部连接处、飞溅区等关键部位。

4.2.2.6 选择的 S-N 曲线应适用于隔水管部件/焊缝的位置（包括焊根和焊趾）、作业模式及焊接工艺。如果缺少典型的隔水管疲劳抗力数据，应对实际部件直接进行疲劳试验，并在试验中适当考虑隔水管的内、外部环境条件。

4.2.2.7 疲劳评估可基于名义应力或热点应力。当采用名义应力方法时，可通过适当的应力分析或应力集中系数计算公式确定应力集中系数，计算可参照 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》第3章的相关要求。

4.2.2.8 疲劳分析中采用的应力范围由应力集中系数及厚度修正系数和名义应力来确定。

4.2.2.9 基于频域的谱疲劳分析流程如下：

- (1) 确定目标位置处在特定波浪频率和浪向下的应力传递函数；
- (2) 根据海况的波浪谱生成应力谱并计算相应的谱矩；
- (3) 利用谱矩计算描述短期应力范围分布的瑞利概率密度函数和描述应力响应的过零频率；
- (4) 对于长期疲劳分析，需评估所有可能海况下的累积疲劳损伤，并找到疲劳寿命最低的关键位置。

4.2.2.10 基于时域的疲劳分析流程如下：

- (1) 根据装载吃水对应的运动响应幅值算子和相位角建立浮体设施模型，创建从悬挂点到 LMRP/BOP 的隔水管模型，并校核隔水管段有效张力准确性；
- (2) 施加波浪和海流环境条件进行时域分析；
- (3) 提取隔水管轴向与环向动应力，计算单海况短期疲劳损伤并找到疲劳寿命最低的关键位置；
- (4) 对于长期累积损伤分析，需评估所有可能海况下的累积疲劳损伤，并找到疲劳寿命最低的关键位置。

4.2.3 分析结果评估

4.2.3.1 应根据疲劳失效准则对隔水管系统波致疲劳分析的结果进行评估，从而判断疲劳寿命是否满足设计要求。

4.2.3.2 隔水管失效后果严重，对于干燥环境中检验维修可达，疲劳强度安全系数至少取 3；对于水下检验维修可达，疲劳强度安全系数至少取 5；对于检验维修不可达，疲劳强度安全系数至少取 10。

第3节 涡激振动疲劳分析

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 隔水管系统 VIV 疲劳分析应预测隔水管因海流及平台运动产生相对振荡流引起的涡激振动而导致的疲劳损伤。当平台在强流区域作业，隔水管处于连接或悬挂状态时，通常需进行 VIV 疲劳分析。

4.3.2 分析要求

4.3.2.1 隔水管系统 VIV 疲劳分析时一般通过数值解法或专业软件进行计算，获得隔水管在外界载荷作用下的应力时间历程，选择合适的 S-N 曲线，计算疲劳累积损伤。

4.3.2.2 隔水管系统 VIV 疲劳分析流程：

- (1) 通过隔水管模型的模态分析，确定横流向和顺流向（如需要）的固有频率和振型；
- (2) 确定沿隔水管的局部泄涡频率；
- (3) 对比泄涡频率和固有频率；
- (4) VIV 响应评估；
- (5) 计算应力幅值及相应的疲劳损伤。

4.3.2.3 隔水管系统 VIV 疲劳分析应考虑海流分布的影响：

- (1) 对于精确的涡激振动分析，需考虑多种流剖面；
- (2) 在极端海况下，应考虑极端的流剖面及其发生概率；
- (3) 计算钻井作业期间累积的疲劳损伤时，可参考流剖面的时间历史记录，并考虑流剖面及其出现概率的影响；
- (4) 隔水管法向上的流速分量应根据隔水管在长度方向的角度变化和来流的入射角进行计算。

4.3.2.4 对设置 VIV 抑制装置的隔水管，宜通过试验验证水动力系数，从而修正隔水

管的疲劳寿命。

4.3.2.5 基于保守考虑，长期 VIV 疲劳分析时，可假定所有的海流剖面的方向同向。对于隔水管在所有海流剖面于不同作用方向下的 VIV 疲劳损伤，应采用最大者用于计算总的长期累积疲劳损伤。

4.3.2.6 隔水管长期 VIV 疲劳分析应采用所有预期方向的一年重现期的海流。每个海流剖面引起的 VIV 疲劳损伤乘以相应海流发生概率的系数，依据 Palmgren-Miner 方法进行线性累积，确定每年的 VIV 疲劳损伤。

4.3.2.7 隔水管涡激振动的表征参数主要有雷诺数、激励力系数和水动力阻尼力系数、涡旋脱落频率和斯特鲁哈尔数等。

4.3.2.8 雷诺数的大小影响着漩涡脱落的方式，隔水管绕流后方漩涡脱落形式随雷诺数变化的规律如表 4.3.2.8 所示。

漩涡脱落形式与雷诺数的关系

表 4.3.2.8

雷诺数范围	漩涡脱落形式
$Re < 5$	无分离现象发生
$5 \leq Re < 40$	隔水管后方出现一对对称的固定小漩涡
$40 \leq Re < 150$	产生周期性交替的层流漩涡
$300 \leq Re < 3 \times 10^5$	亚临界区，周期性交替发放的湍流漩涡，完全湍流区可延伸至 50D 以外
$3 \times 10^5 \leq Re < 3 \times 10^6$	过渡区，接触区域分离点后移，漩涡发放不再具有周期性交替特点，拖曳力降低
$Re > 3 \times 10^6$	超高临界区，涡流区重新恢复周期性交替的湍流漩涡发放

4.3.2.9 斯特鲁哈尔数表征着漩涡脱落特性的相似性准则，是漩涡脱落频率的一种无量纲表达式，用来描述流体边界层分离的不稳定性，其与涡泄频率的关系如下所示：

$$f_{st} = \frac{S_t U}{D}$$

式中： f_{st} ——涡泄频率，Hz；

S_t ——斯特鲁哈尔数，无量纲量；

U ——来流速度，m/s；

D ——隔水管外径，m。

4.3.2.10 影响斯特鲁哈尔数的主要因素有结构体形状、粗造度以及雷诺数。隔水管斯特鲁哈尔数可由图 4.3.2.10 按雷诺数确定。

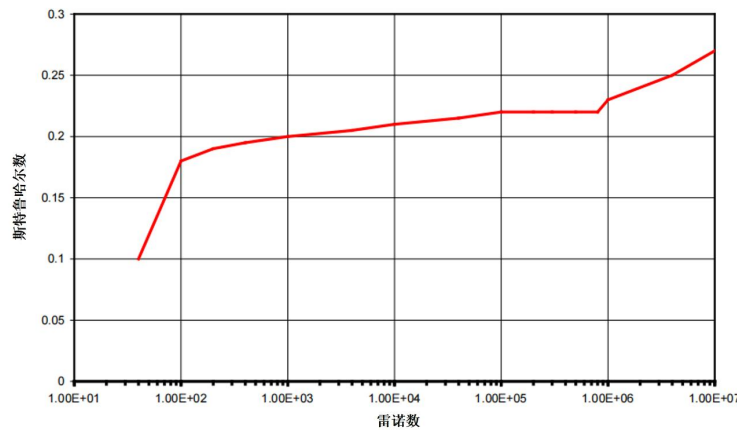


图 4.3.2.10 不同雷诺数下斯特鲁哈尔数

4.3.2.11 隔水管在涡激振动过程振动方向受到与速度同相激励力和与速度反相水动力阻尼力作用，其表达式如下：

$$F_e(t) = C_e \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D \cdot \cos(\omega t + \Phi_0) \quad \text{kN/m}$$

$$F_d(t) = -c_h \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \Phi_0) \quad \text{kN/m}$$

式中：

$F_e(t)$ ——隔水管单位长度上涡激振动方向受到的与速度同相的激励力，kN/m；

$F_{d(t)}$ —— 隔水管单位长度上涡激振动方向受到的与速度反相的水动力阻尼力, kN/m;

ρ —— 流体密度, kg/m³;

D —— 隔水管外径, m;

U —— 来流速度, m/s;

A —— 结构振动幅值, m;

ω —— 振动圆频率, rad/s;

Φ_0 —— 振动初相位;

c_e —— 激励力系数, 为非定常函数, 取决于振动频率与幅值;

c_h —— 水动力阻尼系数, 可由 Venugopal 模型或实验确定。

4.3.2.12 激励力系数 c_e 用于表征流体对隔水管振动的能量输入能力, 一般通过强迫振动试验获得。在无进一步试验数据时, 可参照不同雷诺数下激励力系数等高线图, 根据无因次频率 f^* 、无因次振幅 A^* 和雷诺数 R_e 获得。

4.3.3 分析结果评估

4.3.3.1 应根据疲劳失效准则对隔水管涡激振动疲劳分析的结果进行评估, 从而判断疲劳寿命是否满足设计要求。评估时宜考虑波致疲劳与涡激振动疲劳的损伤叠加。

4.3.3.2 隔水管失效后果严重, 对于干燥环境中检验维修可达, 疲劳强度安全系数至少取 3; 对于水下检验维修可达, 疲劳强度安全系数至少取 5; 对于检验维修不可达, 疲劳强度安全系数至少取 10。

第5章 修井隔水管系统分析的特殊要求

第1节 一般规定

5.1.1 一般要求

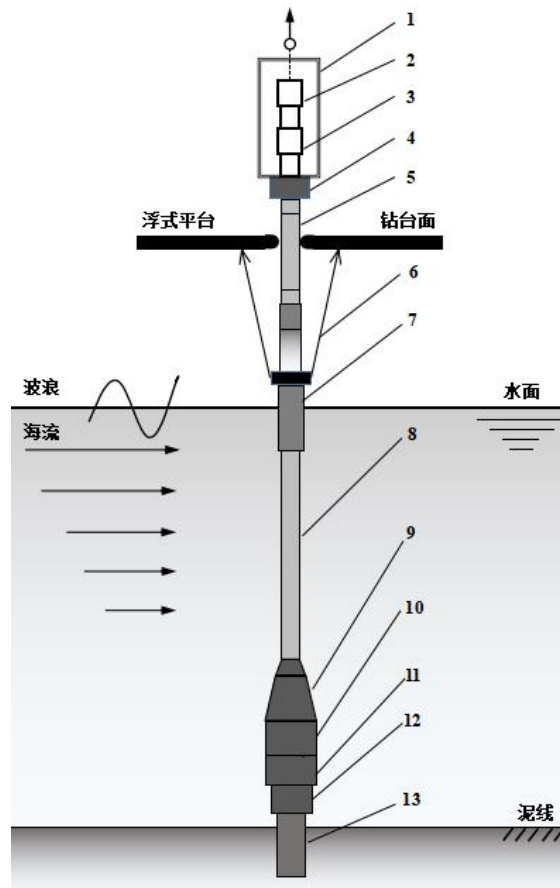
5.1.1.1 本章规定了修井隔水管系统在分析及验证方面的特殊要求。修井作业的目标井通常为生产井，井口压力高、作业流体多样，且修井隔水管结构更为轻量化，其分析要求与钻井隔水管系统存在差异。

5.1.1.2 本章仅适用于低合金碳钢材质的修井隔水管系统。对于采用复合材料、柔性管和钛合金等特殊材料的修井隔水管系统应予以特别考虑，必要时应通过试验验证。

5.1.2 修井隔水管系统构成

5.1.2.1 典型的修井隔水管系统构成应包括但不限于如下部分，详见图 5.1.2.1。

- (1) 提升框架，内部安装有：注入头、修井防喷器组等；
- (2) 地面测试树；
- (3) 防磨短节；
- (4) 张紧器；
- (5) 伸缩节；
- (6) 修井隔水管单根；
- (7) 修井隔水管下部总成，主要包括应力短节、应急解脱连接器、封井装置等；
- (8) 井口；
- (9) 导管、套管。



1-提升框架；2-注入头；3-修井防喷器组；4-地面测试树；5-防磨短节；6-张紧器；7-伸缩节；8-修井隔水管单根；9-应力短节；10-应急解脱连接器；11-封井装置；12-井口；13-导管。

图 5.1.2.1 修井隔水管系统构成示意图

5.1.3 修井隔水管系统功能

5.1.3.1 修井隔水管系统除提供基本的压力屏障和井眼通道外，还应具备以下功能：

- (1) 支持钢丝绳、连续油管作业和井筒封井作业；
- (2) 容纳生产油管或钻柱，并承受其操作载荷；
- (3) 为水下采油树控制提供液压和电气通道；
- (4) 在应急情况下，能实现与水下采油树的快速、安全解脱。

5.1.4 作业模式

5.1.4.1 修井隔水管系统的分析及验证应涵盖以下典型作业模式：

- (1) 下放/回收模式：下入或回收整个修井隔水管系统及 LWRP；
- (2) 正常修井模式：进行钢丝绳、连续油管、生产测试或循环洗井等作业；
- (3) 过提/解卡模式：处理管柱遇卡等非正常情况，需施加远超正常值的提升力；
- (4) 应急解脱模式：在极端环境或设备故障时，启动紧急脱离程序。

第 2 节 修井隔水管系统分析的特殊要求

5.2.1 分析要求

5.2.1.1 修井隔水管系统的整体分析模型应额外考虑以下因素产生的效应：

- (1) 管中管配置：分析模型应包含位于隔水管内部的油管柱或作业管柱。需考虑内外管柱之间的相互作用、潜在的碰撞风险以及内部管柱振动对整体动态响应的影响。
- (2) 复杂的压力与温度剖面：修井液密度、井下生产流体的温度以及关井压力共同作用，形成复杂的内部压力与温度剖面，对隔水管有效张力和材料性能产生显著影响。
- (3) 修井隔水管下部总成的特殊边界条件：LWRP 与水下设备连接，其边界条件更为复杂。分析时，水下采油树的强度和井口承载力应作为关键的底部边界输入。

5.2.1.2 修井隔水管下部总成应能保证钢丝或连续油管设备进行水下井筒的安全修井作业，保障水下井口始终处于安全的压力状态，并具备实现与水下设备的快速解脱的功能。

5.2.2 壁厚与局部屈曲

5.2.2.1 修井隔水管主管通常采用相对较薄的壁厚以减轻重量，分析中必须对局部屈曲进行专项校核。

5.2.2.2 局部屈曲分析应综合考虑轴向压力、外部静水压力以及弯曲载荷的共同作用。应根据隔水管的几何参数和材料特性，计算其在设计载荷下的局部屈曲临界载荷，并满足足够的安全裕量。

5.2.3 应力短节分析

5.2.3.1 应力短节是修井隔水管系统的关键部件，其设计应能有效减少隔水管根部的弯曲应力集中。分析中应关注应力短节底部位置的受力状况，其承受的弯矩和应力应满足分析准则的要求。

5.2.3.2 应力短节的长度与刚度设计应基于动力学分析结果进行优化，以确保在预期的作业窗口内其转角始终处于允许范围内，避免超载运行。

5.2.4 应急解脱分析

5.2.4.1 应急解脱分析除满足本指南第 3 章第 7 节的相关要求外，还应特别关注：

- (1) 解脱后，内部管柱（油管或连续油管）与修井隔水管之间的相对运动及潜在的干涉问题。

(2) LWRP 与水下采油树解脱序列的时序可靠性, 确保在预定的时间内完成所有解脱动作。

5.2.5 疲劳分析

5.2.5.1 修井隔水管系统的疲劳分析应重点关注:

- (1) 由于内部管柱作业(如钢丝绳、连续油管的起下)引起的高频循环载荷;
- (2) 在长期悬挂作业期间, 平台运动与涡激振动耦合作用下的疲劳损伤;
- (3) 应力短节、连接螺纹等应力集中区域的疲劳寿命。

5.2.6 分析结果评估

5.2.6.1 修井隔水管的作业角度准则见表 5.2.6.1。

修井隔水管作业角度准则要求

表 5.2.6.1

作业条件	上部挠性接头/球接头允许转角	下部挠性接头/球接头允许转角
下放和回收 ^a	±2.0°	±1.0°
正常运行 ^b	±4.0°	±3.0°
过提/解卡 ^c	±3.0°	±2.0°
应急解脱 ^d	90% 可用	90% 可用
^a 该角度应允许油管挂、油管挂下入工具和送入管柱通过。 ^b 适用于钢丝绳、连续油管、循环等标准作业。 ^c 适用于处理卡管柱等极限载荷工况。 ^d 确保在极限角度下仍能成功解脱。		

5.2.6.2 修井隔水管的应力限制准则要求见表 5.2.6.2。

修井隔水管应力准则要求

表 5.2.6.2

设计工况	许用应力值/屈服应力
正常作业 ^a	0.67
压力测试 ^b	0.90
过提/解卡 ^c	0.80
自存/应急解脱 ^d	1.0
^a 适用于所有常规修井作业。 ^b 适用于隔水管系统及组件的压力完整性测试。 ^c 适用于短暂的极限操作载荷工况。 ^d 仅适用于极端环境条件下的应急工况, 避免结构发生永久变形。	