指导性文件
GD028-2026

中　国　船　级　社

半潜式平台气隙分析技术指南

2026

2026 年 10 月 1 日生效

北　京

目　录

第 1 章　总　则 1

第 1 节　一般规定 1
第 2 节　定义 1

第 2 章　气隙分析方法 2

第 1 节　一般规定 2
第 2 节　频域气隙分析方法 3
第 3 节　时域气隙分析方法 4
第 4 节　模型试验 4

第 3 章　环境条件 5

第 1 节　一般规定 5
第 2 节　波浪 5
第 3 节　风和流 6

第 4 章　波面升高 7

第 1 节　一般规定 7
第 2 节　线性波面升高 7
第 3 节　不对称系数 7
第 4 节　波面升高二阶传递函数 8

第 5 章　频域气隙分析方法 10

第 1 节　一般规定 10
第 2 节　波频响应 10
第 3 节　低频响应 12
第 4 节　平均响应 14
第 5 节　频域气隙极值预报 15

第 6 章　时域气隙分析方法 16

第 1 节　一般规定 16
第 2 节　时域响应 16

附录 1　非线性效应 19

第 1 节　一般规定 19
第 2 节　非线性效应 19
第 3 节　不对称系数的标定方法 19

第1章 总 则

第1节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南为开展半潜式平台（柱稳式平台）气隙分析提供方法，对于其它结构形式的平台，可参照本指南中适用要求执行。

1.1.1.2 半潜式平台气隙还应符合中国船级社（以下简称 CCS）《海上移动平台入级规范》和《海上浮动设施入级规范》的相关适用规定。

1.1.2 指南引用文件说明

1.1.2.1 相关文件中的条款通过本指南的引用将成为本指南的条款，凡是未注明日期的引用文件，其最新版本适用于本指南。

第2节 定义

1.2.1 定义

1.2.1.1 除另有规定外，本指南有关定义如下：

（1）气隙：系指半潜式平台上壳体底部与波峰之间的垂向距离，亦称峰隙。

（2）静气隙：系指平台在静水中且平台处于正浮状态时，上壳体底部到静水面的垂向距离。

（3）相对波面升高：系指瞬时波面升高与平台垂向运动之差。

（4）不对称系数：系指线性波面升高的修正因子（考虑非线性波浪的不对称性和非线性绕射效应）。

（5）远柱区：系指目标气隙点至最近立柱外缘的最短水平距离大于或等于 0.5 倍的立柱直径或方立柱宽度的区域。

（6）近柱区：系指目标气隙点至最近立柱外缘的最短水平距离小于 0.5 倍的立柱直径或方立柱宽度的区域。

第 2 章　气隙分析方法

第 1 节　一般规定

2.1.1　一般要求

2.1.1.1　气隙是半潜式平台设计中的关键参数，气隙过小可能导致平台结构承受波浪砰击而损坏；气隙过大则会降低平台稳性。

2.1.1.2　气隙的合理取值可通过数值计算（频域或时域分析方法）、模型试验或母型平台经验确定。

2.1.2　气隙计算公式以及考虑因素

2.1.2.1　对于在风浪流等环境条件下，瞬时气隙 $a(x,y,t)$ 由平台的运动和环境条件确定，如图 2.1.2.1 所示，可以表示为：

$$a(x,y,t)=\left[a_0(x,y)+z_p(x,y,t)\right]-\eta(x,y,t)=a_0(x,y)-\zeta(x,y,t)$$

式中：$z_p(x,y,t)$——平台在 (x,y) 点处的垂向运动，m；

$a_0(x,y)$——静气隙，m；

$\eta(x,y,t)$——(x,y) 点瞬时波面升高，m；

$\zeta(x,y,t)$——(x,y) 点相对波面升高，$\zeta(x,y,t)=\eta(x,y,t)-z_p(x,y,t)$，m。

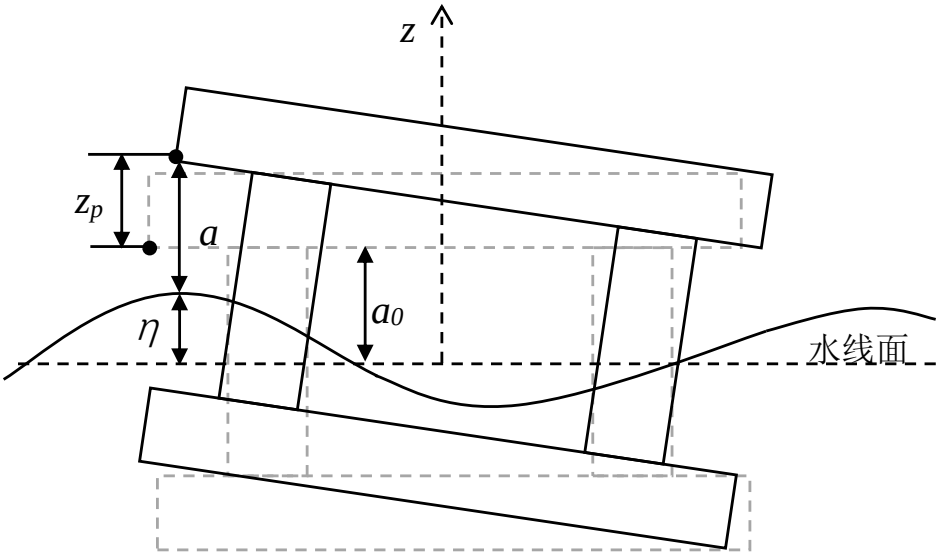


图 2.1.2.1　瞬时气隙的示意图

2.1.2.2　平台在 (x,y) 处的垂向运动 $z_p(x,y,t)$ 可以表示为：

$$z_p(x,y,t)=z_{mean}(x,y)+z_{WF}(x,y,t)+z_{LF}(x,y,t)$$

式中：$z_{mean}(x,y)$——平台平均运动，m；

$z_{LF}(x,y,t)$——平台低频运动，m；

$z_{WF}(x,y,t)$——平台波频运动，m，可表示为：

$$z_{WF}(x,y,t)=\xi_3(t)+(y-y_G)\sin[\xi_4(t)]-(x-x_G)\sin[\xi_5(t)]$$

式中：$\xi_3(t)$——波频垂荡运动，m；

$\xi_4(t)$——波频横摇运动，rad；

$\xi_5(t)$——波频纵摇运动，rad；

(x_G,y_G)——平台重心位置，x_G为重心纵向位置，y_G为重心横向位置，m。

2.1.2.3 采用数值方法进行气隙分析时，需考虑以下因素：

（1）环境条件；

（2）装载工况；

（3）平台运动；

（4）波面升高。

2.1.2.4 对设有推进器的半潜式平台，由推进器作用力产生的倾覆力矩会引起平台横摇或纵摇，从而在立柱附近或平台端部等关键位置产生较大的垂向运动，这可能使实际气隙小于数值分析值。在缺乏更详细分析的情况下，可采用考虑推进力不利组合的静态纵倾状态进行计算。

第 2 节 频域气隙分析方法

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 频域气隙分析方法基于三维绕射-辐射理论，采用频域方法计算平台的运动及流场场点的波面升高。

2.2.1.2 相对波面升高极值通过随机统计方法确定。

2.2.1.3 频域气隙分析时，若不考虑非线性修正，线性分析可能会显著低估平台附近的波面升高和平台的运动，应采用修正系数考虑波面升高和平台运动的非线性效应：

（1）波面升高的非线性效应可通过引用波浪不对称系数（详见第 4 章 4.3.2）进行修正；

（2）半潜式平台的气隙分析需考虑平台平均运动和低频运动。

2.2.2 频域气隙分析流程

2.2.2.1 半潜式平台频域气隙分析流程如下：

（1）确定输入，包括半潜式平台装载工况、重量重心、惯性矩、粘性阻尼以及环境条件等参数；

（2）定义目标气隙点，目标气隙点至少应包含平台中心点、立柱区域周围位置以及上壳体底部外缘位置，如果其他位置有被波峰超过的风险，也需要进行分析；

（3）建立水动力模型，进行频域水动力分析，获得平台运动传递函数以及波面升高传递函数；

（4）根据平台运动传递函数，计算目标气隙点的垂向运动；

（5）考虑不对称系数的影响，计算波频相对波面升高传递函数；

（6）根据环境条件，并考虑平均响应和低频响应（详见第 5 章第 3 节和第 4 节），采用统计方法分析气隙计算点的相对波面升高极值；

（7）气隙极值为静气隙减去相对波面升高极值。

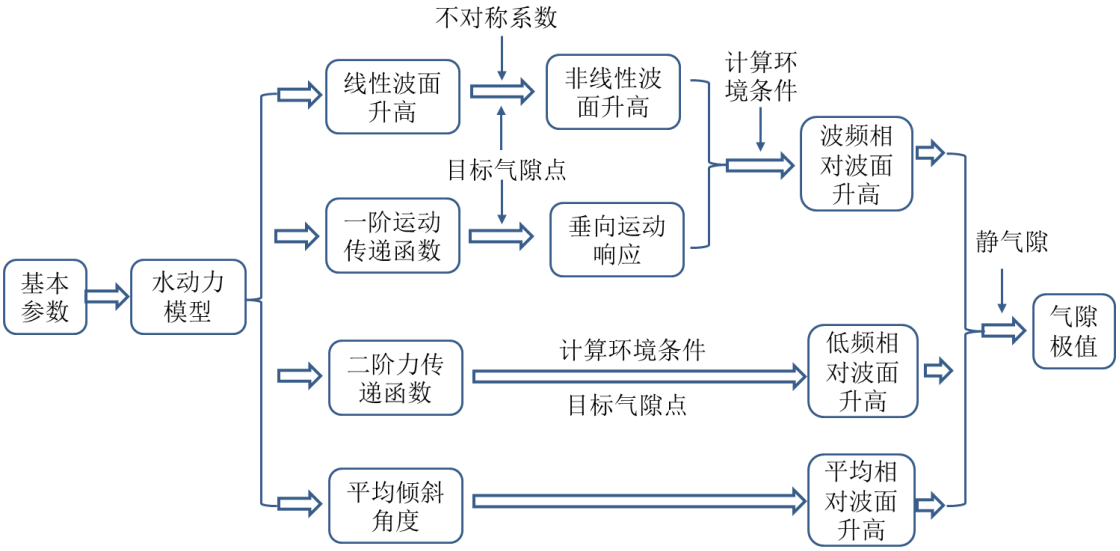


图 2.2.2.1　频域气隙计算流程图

第 3 节　时域气隙分析方法

2.3.1　一般要求

2.3.1.1　时域气隙分析方法可在时域内求解平台运动中的非线性效应，从而提高气隙分析的准确性，获得与模型试验结果更好的一致性。

2.3.1.2　时域气隙分析方法可基于三维绕射-辐射理论求解波面升高，然后采用波浪不对称系数（详见第 4 章 4.3.2）进行修正。

2.3.1.3　采用基于二阶波浪绕射理论的方法模拟非对称波面时，应通过模型试验修正二阶时域分析的波面升高结果。

第 4 节　模型试验

2.4.1　一般要求

2.4.1.1　模型试验是评估半潜式平台气隙最直接的方法，但不适用于平台初期设计阶段，在后期设计阶段可通过模型试验得到关键工况的气隙结果。

2.4.1.2　模型试验无法得到所有设计工况的气隙结果，需要结合数值分析对平台气隙结果进行全面分析和校准。模型试验数据可用于校准和验证数值分析结果。

第 3 章 环境条件

第 1 节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 气隙分析应明确所在海域的环境条件，环境条件至少包括风、浪、流和水深等参数。

3.1.1.2 对于半潜式移动平台，其在不同操作模式下的重现期应满足 CCS《海上移动平台入级规范》（2023）第 2 篇第 2 章的要求；对于半潜式浮动设施，其在不同操作模式下的重现期应满足《海上浮动设施入级规范》（2023）第 2 篇第 5 章的要求。

第 2 节 波浪

3.2.1 短期波浪条件

3.2.1.1 随机波浪可通过线性随机波浪模型（波浪谱）进行描述。波浪谱定义了能量在不同频率和方向上的分布，并以经验公式表达。通常情况下，波浪谱参数包括有义波高和代表性频率或周期（谱峰周期或跨零周期），必要时还需提供谱峰升高因子、平均方向及波浪散布函数等。

3.2.1.2 常见的波浪谱有 Pierson-Moskowitz 单参数谱（以下简称“P-M 谱”）和 JONSWAP 波浪谱。P-M 波浪谱适用于充分发展的海浪；JONSWAP 波浪谱是在峰值处进行加强改进的 P-M 谱。

3.2.1.3 对于 JONSWAP 谱，回归分析得到谱峰周期和跨零周期的关系：

$$T_z \Big/ T_p = 0.6673 + 0.05037\gamma - 0.006230\gamma^2 + 0.000334\gamma^3$$

式中：T_p——谱峰周期，s；

T_z——跨零周期，s；

γ——谱峰升高因子。

3.2.1.4 真实海况下的波面是三维且方向散布的短峰波，可通过引入方向散布函数来考虑散布特性。但一般完备的波浪散布数据比较难以获得。实际应用中，一般海况假定为单一方向的长峰波，如需考虑散布特性，应按 CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》（2021）第 5 章 5.2.2.3 的要求进行选择。

3.2.1.5 有义波高和跨零周期的关系可表示为：

$$H_s = \begin{cases} \dfrac{gT_z^2}{20\pi} & T_z \le 6\text{s} \\ \dfrac{gT_z^2}{15\pi}\left(1 - \dfrac{T_z}{24}\right) & 6\text{s} < T_z < 12\text{s} \\ \dfrac{gT_z^2}{30\pi} & T_z \ge 12\text{s} \end{cases}$$

式中：H_s——有义波高，m。

有义波高和谱峰周期的关系可表示为：

$$H_s=\begin{cases}\dfrac{gT_p^2}{30\pi} & T_p\le 8\text{s}\\ \dfrac{gT_p^2}{30\pi}\left(\dfrac{51}{35}-\dfrac{2T_p}{35}\right) & 8\text{s}<T_p<15\text{s}\\ \dfrac{gT_p^2}{50\pi} & T_p\ge 15\text{s}\end{cases}$$

第 3 节 风和流

3.3.1 风

3.3.1.1 半潜式平台气隙计算时通常只考虑定常风，必要时，还需要考虑风波动分量引起的低频力。

3.3.1.2 只计算定常风力时，设计风速取为平均海平面以上 10m 处时距为 1 分钟的平均风速。

3.3.1.3 除定常风力外，还考虑低频风力时，定常风速一般按 1 小时平均风速计算，其波动风速按合适的经验阵风谱考虑，风谱可按 CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》（2021）第 4 章选取。定常风速的时距应和确定风谱时所使用的平均风速一致。

3.3.2 流

3.3.2.1 流速应取平台作业海域范围内的设计流速。

第 4 章 波面升高

第 1 节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 实际波面升高包含入射波、由于平台存在产生的绕射波、平台本身运动产生的辐射波以及立柱附近波浪爬升等其他非线性引起的波面升高。

4.1.1.2 由于入射波的不对称性以及非线性绕射的影响显著，在计算波面升高时需要计入非线性波面升高。

4.1.1.3 由于波浪非线性理论比较复杂，且在数值模拟上存在一定难度和挑战。因此可采用一种简化的方法进行非线性波面升高计算，即通过引入不对称系数对线性波面升高进行修正。

第 2 节 线性波面升高

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 线性波面升高包括未受干扰的入射波、绕射波和辐射波引起的波面升高，绕射波和辐射波引起的波面升高可以通过在频域或时域中进行线性绕射-辐射分析得到。

4.2.1.2 对于给定点的线性波面升高可以表达为：

$$\eta^{(L)} = \eta_I^{(L)} + \eta_D^{(L)} + \eta_R^{(L)}$$

式中：$\eta^{(L)}$——线性波面升高，m；

$\eta_I^{(L)}$——入射波面升高，m；

$\eta_D^{(L)}$——绕射波面升高，m；

$\eta_R^{(L)}$——辐射波面升高，m。

第 3 节 不对称系数

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 鉴于二阶势流分析方法在计算波面升高工程验证与应用经验仍有限，一般推荐采用不对称系数考虑波面升高的非线性效应。

4.3.1.2 线性波面升高可由绕射-辐射分析得到，总的波面升高可以表达为：

$$\eta = \eta^{(L)} + \eta^{(NL)} = \alpha\eta^{(L)}$$

式中：η——总波面升高，m；

$\eta^{(NL)}$——非线性波面升高，m；

α——不对称系数。

4.3.1.3 不对称系数主要考虑以下非线性效应：

（1）入射波的不对称性：陡峭波浪的波峰变陡、波谷变平（斯托克斯二阶或更高阶效应）；

（2）非线性绕射效应：波浪与结构相互作用产生的局部波面升高增强。

4.3.1.4 不对称系数主要描述流场的整体非线性升高，不适用于立柱近壁处波浪爬升、射流等强非线性局部现象。若考虑立柱附近的局部爬升及由此引起的局部冲击载荷，建议通

过模型试验或经验证的高阶数值方法进行评估。

4.3.1.5 不对称系数随水平位置、入射浪向变化。不对称系数取值应根据模型试验或经验证的高阶数值方法进行标定，标定流程参照本指南附录 1。

4.3.1.6 对于常规的半潜式平台设计，当无模型试验或无经验证的高阶数值分析结果时，不对称系数取值可按照本指南 4.3.2 节推荐值选取。

4.3.2 不对称系数取值建议

4.3.2.1 对远离立柱影响区、以整体波面升高为主的气隙计算点（以下简称远柱区），不对称系数α可表达为下式：

$$\alpha = 1 + 0.4517X$$

X为表征海况非线性强度的无量纲参数，定义为：

$$X = k_p \left| H_\eta \right|_{90}^{\max} A_P$$

式中：k_p——谱峰频率f_p（或$\omega_p = 2\pi f_p$）对应波数，按色散关系$\omega_p^2 = gk_p \tanh(k_p h)$求解；

深水条件可取$k_p \approx \omega_p^2 / g$；

A_P——3 小时海况下 90%分位的线性设计波峰高度$A_P = \frac{H_s}{4}\left[-2\ln(1-(0.9)^{\frac{1}{N_{WF}}})\right]^{1/2}$

（N_{WF}详见第 5 章 5.2.5.3），m。

$\left|H_\eta\right|_{90}^{\max}$——气隙测点处波面传递函数模值在入射波谱 90%能量带频率范围$[f_{\min}, f_{\max}]$内的最大值，$f_{\min}$和$f_{\max}$根据波浪谱能量积分确定，即需要满足：

$$\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f)df = 0.9\int_0^\infty S(f)df$$

4.3.2.2 上述公式为基线项和远柱项的两阶段经验模型的简化表达，用于远柱区整体波面升高的非线性波面升高估算。其推荐适用范围为百年一遇不规则波海况，且谱峰周期建议满足$T_p \geq 11s$。当$T_p < 11s$时，拟合一致性可能降低；如需使用，可作为初步估算，并应按附录 1 或通过模型试验/经验证的高阶数值方法进行校核。

4.3.2.3 不对称系数的公式不适用于可能存在波浪爬升、射流、破碎等强局部非线性现象的近柱区；近柱区的不对称系数建议采用模型试验/高阶数值方法评估，或采用附录 1 的完整公式并结合工程校核。

4.3.2.4 当平台几何外形新颖或附体复杂时，上述不对称系数不再适用，应按附录 1 进行标定。

第 4 节 波面升高二阶传递函数

4.4.1 一般要求

4.4.1.1 二阶波面升高是指由波浪非线性（包括自由表面边界条件非线性、结构边界条件非线性以及入射波非线性等）引起的、相对于一阶线性波面升高的附加波面升高。二阶波面升高可用二阶传递函数在频域内表达。

4.4.1.2 二阶波面升高的主要来源包括：

（1）入射波非线性导致的波峰-波谷不对称效应；

（2）结构存在引起的二阶绕射效应；

（3）结构运动引起的二阶辐射效应；

（4）自由液面条件及体边界条件的二阶项耦合效应。

4.4.2 波面升高的频域表达

4.4.2.1 总波面升高为一阶波面升高和二阶波面升高叠加之和：

$$\eta(x,y,t)=\sum_{n=1}^{N}H_n\bar{\eta}_n\cos(k_nx-\omega_nt+\varepsilon_n)$$
$$+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\bar{\eta}_m\bar{\eta}_nR_{nm}^{(2)+}\cos\left[(k_n+k_m)x-(\omega_n+\omega_m)t+\varepsilon_m+\varepsilon_n+\varphi_{nm}^{+}\right]$$
$$+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\bar{\eta}_m\bar{\eta}_nR_{nm}^{(2)-}\cos\left[(k_n-k_m)x-(\omega_n-\omega_m)t+\varepsilon_n-\varepsilon_m+\varphi_{nm}^{-}\right]$$

式中：$\bar{\eta}_n,\bar{\eta}_m$——线性规则波幅值，m；

k_n,k_m——波数；

ω_n,ω_m——波浪圆频率，rad/s；

$\varepsilon_n,\varepsilon_m$——线性规则波相位，rad；

H_n——波面升高一阶传递函数，m/m；

$R_{n,m}^{(2)+}$——波面升高和频二阶传递函数，m/m^2；

φ_{nm}^{+}——波面升高和频二阶传递函数的相位，rad；

$R_{n,m}^{(2)-}$——波面升高差频二阶传递函数，m/m^2；

φ_{nm}^{-}——波面升高差频二阶传递函数的相位，rad；

m,n——不规则波分解后的线性规则波分量编号。

4.4.2.2 二阶波面升高通常可分为和频（sum-frequency）与差频（difference-frequency）两类分量：

（1）和频分量对应频率 $\omega_n+\omega_m$，主要表征波峰增强、局部高频尖峰等效应；

（2）差频分量对应频率 $|\omega_n-\omega_m|$，主要表征缓变（低频）自由表面变化。

4.4.3 适用性与局限性

4.4.3.1 二阶波面升高表达了不同频率的耦合关系，可用于描述以下现象：

（1）极端波峰增强与偏态形成机理；

（2）低频自由表面缓变分量的形成机理；

（3）多立柱/多体系统中频率耦合导致的局部放大趋势。

4.4.3.2 二阶波面升高传递函数理论上相较于线性方法更为完备。但当波面升高偏离平滑的斯托克斯型非线性特征，或者存在波浪破碎、强涡量与黏性耗散、局部浅水效应、立柱近壁爬升等强非线性现象时，二阶传递函数不适用。

4.4.3.3 二阶波面升高传递函数对数值离散（频率网格、方向组合、场点选择）与边界条件处理敏感；不同数值程序对二阶自由面/二阶绕射的实现范围存在较大差异，用于工程设计前应通过模型试验或已验证的基准算例进行校核。

第 5 章 频域气隙分析方法

第 1 节 一般规定

5.1.1 一般要求

5.1.1.1 半潜式平台频域气隙分析应包含波频响应、平均响应和低频响应。

5.1.1.2 宜采用波浪绕射-辐射和莫里森混合模型进行半潜式平台运动响应分析，以计及立柱及其他小尺度构件的粘性阻尼。

5.1.1.3 频域气隙分析方法主要是采用短期预报的方法。

5.1.1.4 对波高小于最大波高，但可能对气隙有更大的影响的波浪亦应进行考虑。

第 2 节 波频响应

5.2.1 水动力分析模型

5.2.1.1 建立水动力分析模型应符合以下原则：

（1）离散的面元模型的静水力特性和质量特性应与平台实际装载状态一致。

（2）应尽可能避免三角形网格，四边形网格的长宽比不应大于 3；

（3）网格的最长边应小于所分析最小波长的 1/7；

（4）几何形状突变区域应采用精细网格模拟。

5.2.2 速度势

5.2.2.1 三维绕射-辐射理论通常采用边界元法进行流场数值求解。流场中的运动可以用速度势描述，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。基于平台在水线面作微幅振荡的假设，可以采用叠加原理对速度势加以分解。流场中的速度势可以分为三部分：入射势、绕射势和辐射势。

$$\Phi(X,Y,Z,t)=\mathrm{Re}\left\{\phi(X,Y,Z)e^{-i\omega t}\right\}$$

式中：$\Phi(X,Y,Z,t)$——速度势；

$\phi(X,Y,Z)$——与时间无关的空间变量，可写为：

$$\phi(X,Y,Z)=\phi_I(X,Y,Z)+\phi_D(X,Y,Z)+\phi_R(X,Y,Z)$$

式中：$\phi_I(X,Y,Z)$——入射势；

$\phi_D(X,Y,Z)$——绕射势；

$\phi_R(X,Y,Z)$——辐射势。

采用线性化的伯努利方程，可得到流场中的波浪动压力 p：

$$p=-\rho\frac{\partial\left[\phi_I(X,Y,Z)+\phi_D(X,Y,Z)+\phi_R(X,Y,Z)\right]e^{-i\omega t}}{\partial t}$$

将波浪动压力沿平台湿表面积分，得到平台湿表面水动力系数矩阵（附加质量和辐射阻尼矩阵）和波浪激励力，结合平台质量矩阵以及恢复刚度矩阵，建立平台频域运动方程：

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

式中：ω——波浪频率，rad/s；

$[M]$——平台质量矩阵；

$[A]$——附加质量矩阵；

$[B]$——辐射阻尼矩阵；

$[K]$——静水恢复刚度矩阵；

$\{\xi\}$——平台运动；

$\{F\}$——波浪激励力。

求解上述方程，即可获取平台在给定参考点的波频运动传递函数以及波面升高传递函数。

5.2.3　粘性阻尼

5.2.3.1　基于绕射-辐射理论对半潜式平台进行运动响应分析时，需建立合适的粘性阻尼模型。建议采用线性化处理的莫里森模型考虑粘性载荷（非线性拖曳力）对半潜式平台运动的影响，莫里森模型的拖曳力系数宜通过模型试验结果进行校准。

5.2.3.2　若采用临界阻尼比计及半潜式平台的粘性阻尼，在缺乏模型试验的情况下，可依据类似结构形式的平台设计经验确定临界阻尼比。等效粘性阻尼 B_{iv} 根据下式计算得出：

$$B_{iv} = 2 \cdot \mu_{ii} \cdot \sqrt{(M_{ii} + A_{ii}) \cdot K_{ii}} \quad (i = 3,4,5)$$

式中：　i——平台运动自由度编号，i=3 为垂荡，i=4 为横摇，i=5 为纵摇；

ii——矩阵中的对角元素；

μ_{ii}——垂荡、横摇和纵摇的临界阻尼比，推荐取 3%~5%；

M_{ii}——垂荡、横摇和纵摇的质量，kg 或 kg·m^2；

A_{ii}——垂荡、横摇和纵摇的附加质量，kg 或 kg·m^2；

K_{ii}——垂荡、横摇和纵摇的静水恢复刚度，N/m 或 N·m/rad。

5.2.4　波频运动响应

5.2.4.1　根据第 2 章 2.1.2，目标气隙点的相对波面升高等于该点的波面升高减去该点的垂向运动，在波频内计算时，二者存在相位差，计算时不能采用幅值，而应基于同相分量（实部）与正交分量（虚部）进行计算得到 $z_{WF}(\omega)$。同时，考虑第 4 章 4.3.2 的不对称系数，波频相对波面升高 $z'_{WF}(\omega)$ 可以表达为：

$$z'_{WF}(\omega) = \alpha\eta^{(L)}(\omega) - z_{WF}(\omega)$$

式中：$\eta^{(L)}(\omega)$——线性波面升高传递函数。

5.2.5　短期极值预报

5.2.5.1　短期海况下，波频相对波面升高是瞬时值呈正态分布、峰值（或幅值）呈瑞利分布的窄带谱随机过程。

5.2.5.2　根据波频相对波面升高和波能谱密度 $S(\omega)$，采用谱分析的方法计算不规则波中的响应谱：

$$S_R(\omega) = \left|z'_{WF}(\omega)\right|^2 \cdot S(\omega)$$

式中：$S_R(\omega)$——相对波面升高的响应谱。

其方差为：

$$\sigma_R^2 = m_0 = \int_0^\infty S_R(\omega)\,d\omega$$

式中：σ_R^2——相对波面升高的方差；

m_0——相对波面升高的响应谱的零阶矩。

5.2.5.3　相对波面升高的平均跨零周期为：

$$T_m = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

式中：T_m——平均跨零周期，s。

m_2——相对波面升高的响应谱的二阶矩，$m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_R(\omega) d\omega$。

短期海况持续时间内的峰值数量 N_{WF} 可以表达为：

$$N_{WF} = \frac{T}{T_m}$$

式中：T——短期海况持续时间，s，一般取 3 小时。

波频相对波面升高峰值的累积分布函数可表示为：

$$F_\zeta(\zeta_{WF}) = P\left(\max(\zeta_1, \zeta_2, ..., \zeta_N) \le \zeta_{WF}\right) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\zeta_{WF}^2}{2\sigma_R^2}\right)\right]^{N_{WF}}$$

式中：$F_\zeta(\zeta_{WF})$——波频相对波面升高峰值的累积分布函数。

对上式进行渐近展开，得到：

$$F_\zeta(\zeta_{WF}) = \exp\left[-N_{WF}\exp\left(-\frac{\zeta_{WF}^2}{2\sigma_R^2}\right)\right] = p$$

式中：p——分位数，建议取 0.9。

根据上式可得到波频相对波面升高极值为：

$$\zeta_{WF} = 2\sigma_R\sqrt{-0.5\ln\left(1 - p^{\frac{1}{N_{WF}}}\right)}$$

式中：ζ_{WF}——波频相对波面升高极值。

第 3 节 低频响应

5.3.1 一般要求

5.3.1.1 低频运动响应可通过频域简化方法计算，即在设计环境条件下计算波浪和风载荷诱导的低频运动谱矩，结合运动传递函数获取低频运动极值。低频运动极值应取设计环境条件下的最可能极大值。

5.3.1.2 上壳体外缘处低频垂向运动的主要影响因素为横摇和纵摇，低频垂荡运动通常可忽略不计。

5.3.2 二阶波浪载荷

5.3.2.1 对半潜式平台，在波浪作用下，除受到与波高成正比的一阶线性波浪载荷外，还受到与波高平方成正比的二阶非线性波浪载荷。二阶波浪载荷包括三个分量，平均分量、低频分量和高频分量。

5.3.2.2 在频域内求解二阶波浪载荷主要有三种方法，远场法、近场法和中场法。远场法只能得到平均分量，即平均波浪漂移力，对于低频分量，可采用 Newman 近似法求解；近场法和中场法可以得到平台六自由度上包括平均、低频和高频分量在内的所有二阶传递函数（即全 QTF）。Newman 近似法在计算效率上具有显著优势，但对垂荡、纵摇和横摇的差频力的误差较大，建议采用全 QTF 矩阵法求解半潜式平台的低频运动响应。

5.3.2.3 采用数值方法计算二阶波浪载荷时，如需对浮体水线面附近区域自由液面网格划分，其划分要确保数值求解的准确性和收敛性。

5.3.3 低频波浪诱导运动

5.3.3.1 低频波浪诱导横摇或纵摇运动的方差为：

$$\sigma_{\xi_i}^2 = \int_0^\infty \left|H_i(\omega)\right|^2 S_{M,i}^{2-}(\omega)d\omega \quad (i=4,5)$$

式中：$\xi_4^{(LF)}$——低频波浪诱导横摇角，rad；

$\xi_5^{(LF)}$——低频波浪诱导纵摇角，rad；

i——平台运动自由度编号，i=4 为横摇，i=5 为纵摇；

$\sigma_{\xi_i}^2$——低频波浪诱导横摇运动或纵摇运动的方差。

$S_{M,i}^{2-}(\omega)$为横摇/纵摇二阶差频波浪力矩谱，计算公式如下：

$$S_{M,i}^{2-}(\omega) = 8\int_0^\infty S(\upsilon)S(\upsilon+\omega)\left[T_i^{2-}(\upsilon,\upsilon+\omega)\right]^2 d\upsilon$$

式中：$T_i^{2-}(\omega_j,\omega_k)$——横摇/纵摇二阶差频力传递函数，N/m；

υ , ω——波浪圆频率，rad/s；

i——平台运动自由度编号，i=4 为横摇，i=5 为纵摇。

$H_i(\omega)$为单位波幅横摇/纵摇传递函数，计算公式如下：

$$H_i(\omega) = \left[-\omega^2\left(M_i + A_i(0)\right) + i\omega B_{iv} + \left(K_i + C_{im}\right)\right]^{-1}$$

式中：$A_i(0)$——频率为零的横摇/纵摇附加质量，可取水动力分析时波浪周期最大（频率最小）处的附加质量，$kg\cdot m^2$；

C_{im}——定位系统恢复力矩，N·m；

B_{iv}——线性化的粘性阻尼系数，N·m·s。

5.3.3.2 对于平台运动过程中水线面面积变化显著的结构形式（如立柱局部增设浮筒时），飞溅区的非线性波浪激励及非线性流体静力学效应的影响不可忽略。基于势流理论的水动力分析软件无法计入上述非线性效应，宜通过模型试验进行分析。

5.3.4 低频风诱导运动

5.3.4.1 低频风诱导运动可通过风载荷谱获取，风诱导横摇/纵摇运动的方差计算公式如下：

$$\sigma_{\xi_i}^2 = \int_0^\infty \left|H_i(\omega)\right|^2 S_{M,i}^{wind}(\omega)d\omega \quad (i=4,5)$$

$S_{M,i}^{wind}(\omega)$为风载荷能量谱，计算公式如下：

$$S_{M,i}^{wind}(\omega) = 4\frac{\bar{F}_d^2 Z_a^2}{\bar{U}_w^2}\left|\varsigma(\omega)\right|^2 S_U(\omega)$$

平台所受的平均风阻力计算公式如下：

$$\bar{F}_d = \frac{1}{2}\rho_a A C_D \bar{U}_w^2$$

气动导纳函数计算公式如下：

$$\left|\varsigma(\omega)\right|=\left[1+\left(\frac{2\omega\sqrt{s}}{3\bar{U}_w}\right)\right]^{-1/2}$$

式中：$S_U(\omega)$——风能谱密度，m^2/s；

i——平台运动自由度编号，i=4 为横摇，i=5 为纵摇；

ρ_a——空气密度，kg/m^3；

s——入射风投影面积，m^2；

C_D——拖曳力系数；

$\bar{U}_w$——入射风速，m/s；

Z_a——投影风面积中心与平台重心之间的距离，该距离可近似为投影风面积中心相对于静水面的高度，m。

5.3.5 低频运动极值

5.3.5.1 假设低频运动极值服从威布尔分布，则低频横摇/纵摇的最大值取最有可能极大值：

$$\xi_i^{(LF)}=\sigma_{\xi_i^{(LF)}}\ln N_{LF}$$

式中：$\sigma_{\xi_i^{(LF)}}$——横摇和纵摇低频运动的标准差；

N_{LF}——低频运动循环次数，$N_{LF}=T/T_n$（T_n 为横摇/纵摇自然周期）。

由横摇和纵摇低频运动引起的垂向运动计算如下：

$$z_{LF}=-(x-x_G)\sin\xi_5^{(LF)}+(y-y_G)\sin\xi_4^{(LF)}$$

5.3.5.2 假设风诱导低频运动和波浪诱导低频运动不相关，则低频垂向运动响应的极值可采用下式计算：

$$z_{LF}=\sqrt{z_{LF,wave}^2+z_{LF,wind}^2}$$

式中：$z_{LF,wave}$——波浪诱导低频运动相应，m；

$z_{LF,wind}$——风诱导低频运动响应，m。

5.3.6 低频相对波面升高

5.3.6.1 由于低频波面升高的贡献可以忽略不计，低频对相对波面升高的贡献为低频运动带来的影响，低频相对波面升高 ζ_{LF} 可以表示为：

$$\zeta_{LF}=-z_{LF}$$

第 4 节 平均响应

5.4.1 一般要求

5.4.1.1 在平均风载荷、平均波浪载荷及流载荷的共同作用下，平台的平均倾角不为零。对于半潜式平台，平均风载荷是其平均倾角的主要影响因素。

5.4.1.2 一般情况下，可通过压载操作将平均倾角调平至零（对应平均吃水状态）；当不能保证压载操作的准确性时，宜取 1° 倾角计算平均响应，以覆盖其不确定性。

第 5 节 频域气隙极值预报

5.5.1 一般要求

5.5.1.1 在进行频域气隙极值预报时，应将平均、波频和低频运动组合，且假设低频和波频部分不相关。因此，总的相对波面升高ζ可以表示为：

$$\zeta = \zeta_{mean} + \sqrt{\zeta_{WF}^2 + \zeta_{LF}^2}$$

式中：ζ_{mean}——平均波面升高，等于平均响应，m。

5.5.1.2 对于某些平台，波频和低频部分具有相关性。如果有模型试验结果，可以通过以下公式表达波频和低频相对波面升高之间的相关性：

$$\zeta = \zeta_{mean} + \sqrt{\zeta_{WF}^2 + \zeta_{LF}^2 + 2\nu\zeta_{WF}\zeta_{LF}}$$

式中：ν——相关系数，可以根据给定的概率水平和模型试验确定。

第 6 章 时域气隙分析方法

第 1 节 一般规定

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 时域气隙分析可以更为准确的模拟波面升高和平台运动的耦合，以及平台运动的非线性效应。在风、浪、流以及系泊和立管的作用下，平均和低频运动在时域中比在频域中计算更为准确。

6.1.1.2 本节时域分析基于以下假设：

（1）波频运动近似线性，波频运动可以在时域与平均和低频运动一起计算，或在频域中与波面升高一起采用绕射-辐射分析计算。粘性效应以及系泊和立管系统可以在频域分析中通过线性化近似考虑；

（2）绕射和辐射的波面升高基于频域中的线性绕射-辐射理论或二阶绕射理论。

6.1.1.3 当非线性效应显著时，6.1.1.2 的假设不适用。对于此种情况，应使用时域中非线性绕射直接计算或计算流体动力学（CFD）分析非线性效应，并通过模型试验进行验证。一般考虑以下非线性效应：

（1）浅水中的非线性波浪效应、近立柱波浪爬升的非线性效应等；

（2）平台运动的非线性，尤其是波频范围内的大幅运动（一般是由于非线性静水恢复刚度等引起的）。

第 2 节 时域响应

6.2.1 随机波时历响应

6.2.1.1 随机波可以由多个不同频率和波幅的规则波叠加而成，考虑到各随机波相位的随机性，随机波的波面升高可表达为：

$$\eta(x,y,t)=\sum_{n=1}^{N}\bar{\eta}_n\cos\left(\omega_n t+\varepsilon_n-k_n x\cos\theta-k_n y\sin\theta\right)$$

式中：$\bar{\eta}_n$ ——第 n 个规则波的波幅，m；

ω_n ——第 n 个规则波的波浪圆频率，rad/s；

ε_n ——第 n 个规则波的随机相位角，取 0 到 2π 之间的任意值；

k_n ——第 n 个规则波的波数，$k_n=2\pi/\lambda_n$（λ_n 为波长）；

θ ——浪向角，°。

6.2.1.2 对于给定的波浪谱，波浪中的每个规则波的波幅可以通过波浪谱 $S(\omega)$ 求解得到，其在频率区间 $(\omega,\omega+\Delta\omega)$ 的规则波在单位面积中的能量为 $\frac{1}{2}\rho g\bar{\eta}_n^2$，与波浪谱在此频率段围成的面积相等（见图 6.2.1.2）：

$$\rho g S(\omega)\Delta\omega=\frac{1}{2}\rho g\bar{\eta}_n^2$$

根据上式可以求解随机波中每个规则波的波幅为：

$$\bar{\eta}_n=\sqrt{2S(\omega_n)\Delta\omega}$$

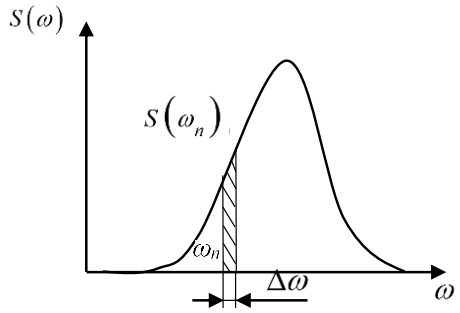


图 6.2.1.2 波浪谱

6.2.1.3 对于波浪的随机性，建议采用随机种子数来表示随机相位角序列，不同的随机种子产生不同的波浪剖面时间历程。

6.2.2 时域运动方程

6.2.2.1 在波浪作用下的平台时域运动方程为：

$$\left[M+A(\infty)\right]\ddot{\xi}(t)+\int_0^t H(t-\tau)\dot{\xi}(t)d\tau+K\xi(t)=F_w^1(t)+F_w^2(t)+F_{moor}(t)+F_{wind}(t)+F_{current}(t)$$

式中：M ——平台质量阵；

$A(\infty)$——无限频率处的附加质量阵；

$H(t)$——时延函数，表征波浪辐射引起的记忆效应，通过频域辐射阻尼变换得到，

$H(t)=\frac{2}{\pi}\int_0^\infty B(\omega)\cos(\omega t)d\omega$，其中 $B(\omega)$ 为频域阻尼；

K ——静水恢复刚度；

$\xi(t),\dot{\xi}(t),\ddot{\xi}(t)$——分别为平台的位移、速度和加速度；

$F_w^1(t),F_w^2(t)$——分别为一阶波浪激励力和二阶波浪激励力；

$F_{moor}(t)$——系泊力；

$F_{wind}(t),F_{current}(t)$——分别为风力和流力。

6.2.2.2 对于半潜式平台，和频二阶响应通常不显著，可以忽略。Newman 近似对横荡、纵摇和艏摇等水平方向的计算效果较好，但对垂荡、纵摇和横摇的差频力误差较大，建议采用全 QTF 进行差频二阶响应预报。

6.2.3 垂向运动时历

6.2.3.1 平台垂向运动宜采用时域方法或频时域混合方法分析。

6.2.3.2 时域方法可参考 6.2.2 中公式进行运动时历求解。

6.2.3.3 为减少计算量，可采用频时域混合方法分析垂向运动。该方法是仅在时域内计算平均运动和低频运动，波频运动通过频域响应转换到时域后与低频时域运动结合。为得到准确的统计数据，应去除初始瞬态响应。具体做法为：

（1）根据本指南第 5 章第 2 节，在频域内计算垂向运动的波频响应；

（2）将垂向运动的波频响应转换为时历曲线（与时域低频运动响应求解时的随机种子数相同）；

（3）在时域内计算平均和低频运动响应时历；

（4）将波频垂向运动的时历与低频垂向运动时历相叠加，得到总的垂向运动时历。

6.2.4 波面升高时历

6.2.4.1 波面升高时历通过将频域内的线性波面升高（扰动后的波面升高）转换到时域，并乘以不对称系数；或者通过在频域内求得线性波面升高以及二阶传递函数（差频与和频），然后基于随机波生成入射波时历（随机种子数与求垂向运动响应时历时保持一致），得到一阶波面升高时历和二阶波面升高时历（差频波面升高时历与和频波面升高时历），总的波面升高时历为一阶和二阶的总和。

6.2.4.2 相对波面升高时历为波面升高时历与垂向运动响应时历之差。

6.2.5 相对波面升高极值

6.2.5.1 对于时域相对波面升高极值计算，至少采用 10 组随机种子数，每组随机种子数至少进行 3 小时模拟。

6.2.5.2 由于二阶的贡献，相对波面升高时历变成非高斯过程。对于非高斯过程，可以对不同种子数的最大值拟合求解极值，常用的有 Gumbel 拟合方法、Winterstein/Jensen 拟合方法和 Weibull 拟合方法。

附录 1 非线性效应

第 1 节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本附录为半潜式平台下壳体和立柱旁波浪爬升等情况的非线性运动和非线性绕射效应分析提供参考。

第 2 节 非线性效应

1.2.1 非线性运动效应

1.2.1.1 对于在波浪作用下下壳体出入水的情况，应通过非线性分析或模型试验进行研究。在非线性时域分析中，平台的湿表面在每个时间步更新，并且波浪激励力和恢复力均基于瞬时湿表面分析，可以采用非线性势流理论或 CFD 分析，但结果需要模型试验验证。

1.2.2 非线性绕射效应

1.2.2.1 在靠近立柱的点，非线性绕射效应显著。

1.2.2.2 基于模型试验和统计分析方法，给出靠近立柱附近（近柱区）非线性相对波面升高的不对称系数。不对称系数可表示为远柱基线项 α 与近柱附加修正项的叠加。远柱区域与近柱区定义为：

远柱区：$s/D \geqslant 0.5$

近柱区：$s/D < 0.5$

式中：s——计算点至最近立柱外缘的最短水平距离，m；

D——立柱直径或方立柱宽度，m。

近柱区不对称系数为：

$$\alpha_D = \alpha + 1.2391 X B(s/D) C(k_p D)$$

式中 α 和 X 计算采用第 4 章 4.3.2 的公式，修正项为：

$$B(s/D) = \max\left(0, 1 - \frac{s}{D}\right)$$

$$C(k_p D) = \max(0, 1 - 0.5 k_p D)$$

第 3 节 不对称系数的标定方法

1.3.1 一般要求

1.3.1.1 当具备与平台几何外形、吃水/载荷工况及环境条件相匹配的模型试验数据时，宜采用模型试验对不对称系数进行校准，以提高波面升高及气隙预报的可靠性。

1.3.1.2 校准所用模型试验应覆盖平台气隙测点最不利的海况与入射方向，并应保证测点位置、坐标系、参考水位与数值模型一致。

1.3.1.3 不对称系数可随测点位置、浪向及海况变化；当试验数据不足以支持空间分布时，可采用关键气隙控制点（例如迎浪侧上壳体外缘、立柱间隙代表点）进行保守估算。

1.3.1.4 校准原则应以气隙测点的相对波面升高（或相对波面升高极值）为目标，使数值分析得到的极值统计水平与模型试验测量结果在统计意义上保持一致。推荐在控制海况下，以相对波面升高极值分布的 90%分位值（P90）确定不对称系数，校准关系式如下：

$$\left(\alpha\eta^{(L)} - z_p\right)_{90} = \zeta_{90}^{test}$$

式中：$\eta^{(L)}$——数值分析得到的线性波面升高，m；

z_p——数值分析得到的测点处平台垂向位移，m；

ζ_{90}^{test}——模型试验测量得到的相对波面升高极值分布的 90%分位值，m。

1.3.1.5 采用 P90 校准时，应确保ζ_{90}^{test}与式中$\eta^{(L)}$、z_p对应相同的频带贡献。由于不对称系数主要表征波频范围内的波峰增强效应，模型试验相对波面升高时历在统计极值前宜进行频带分离或高通滤波，剔除平台低频运动对相对波面升高的影响。

1.3.1.6 确定相对波面升高极值分布 90%分位值时，应采用可靠的统计方法与一致的数据处理程序，并宜符合以下要求：

（1）若具备多个 3 小时海况的试验样本，宜以各样本最大值序列拟合 Gumbel 极值分布确定 P90；

（2）当试验样本不足时，可采用超阈值模型进行估计，以提高极值拟合稳定性；

（3）对于数值分析结果的处理：若采用频域分析方法，可基于响应谱与峰值分布假设推导极值分布；若采用时域分析方法，应按与试验相同的分段、滤波、极值提取与拟合的流程处理。