

指导性文件

GUIDANCE NOTES

GD025-2025



中国船级社

半潜式平台总体强度直接 计算技术指南

2025

2026年1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	2
第 2 章 环境条件和载荷	3
第 1 节 一般规定	3
第 2 节 环境条件	3
第 3 节 波浪载荷	5
第 4 节 重力及功能载荷	7
第 3 章 设计波法	8
第 1 节 一般规定	8
第 2 节 随机性设计波法	8
第 3 节 确定性设计波法	9
第 4 节 特征载荷	9
第 4 章 总体强度评估	13
第 1 节 一般规定	13
第 2 节 结构分析模型	13
第 3 节 载荷加载与边界条件	14
第 4 节 半潜式移动平台强度校核衡准	15
第 5 节 半潜式浮动设施强度校核衡准	17
附录 1 设计波全相位最大应力计算方法	19
第 1 节 一般规定	19
第 2 节 计算方法及原理	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（以下简称“平台”）总体强度评估提供方法和校核衡准。

1.1.1.2 半潜式平台总体强度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 适用范围

1.1.2.1 本指南适用于双下壳体和环状下壳体半潜式平台在漂浮状态下主体结构的总体强度评估。对于其它结构形式的半潜式平台，可参照本指南中适用要求执行。

1.1.2.2 半潜式平台总体强度评估是分析平台在环境载荷和重力及功能载荷联合作用下主体结构的强度。主体结构应该包括平台下壳体、撑杆、立柱和上壳体的板、桁材和加强筋等结构构件。

1.1.3 总体强度评估报告

1.1.3.1 半潜式平台总体强度评估报告内容至少应包括：

- (1) 所参考的图纸；
- (2) 操作模式概况；
- (3) 结构有限元模型的详细描述和图示；
- (4) 所使用材料特性的详细情况；
- (5) 边界条件的详细描述；
- (6) 所施加载荷的详细情况；
- (7) 总体和局部的结构响应，包括变形与应力云图等；
- (8) 强度评估结果汇总表；
- (9) 必要时，对结构的建议修改方案。

1.1.4 总体强度评估分析流程

1.1.4.1 半潜式平台总体强度评估流程如下：

- (1) 根据图纸资料，建立半潜式平台水动力模型和结构有限元模型，并提取质量参数；
- (2) 对水动力模型进行频域水动力计算，并结合质量参数以及选取的特征载荷，得到特征载荷响应幅值算子（RAO）；
- (3) 根据给定的波浪参数（规则波/随机波），采用设计波法，得到设计波参数，进而得到作用在结构模型上的映射载荷；
- (4) 施加载荷，设置边界条件，对有限元模型进行结构计算，得到结构应力；
- (5) 按照校核衡准进行总体强度评估。

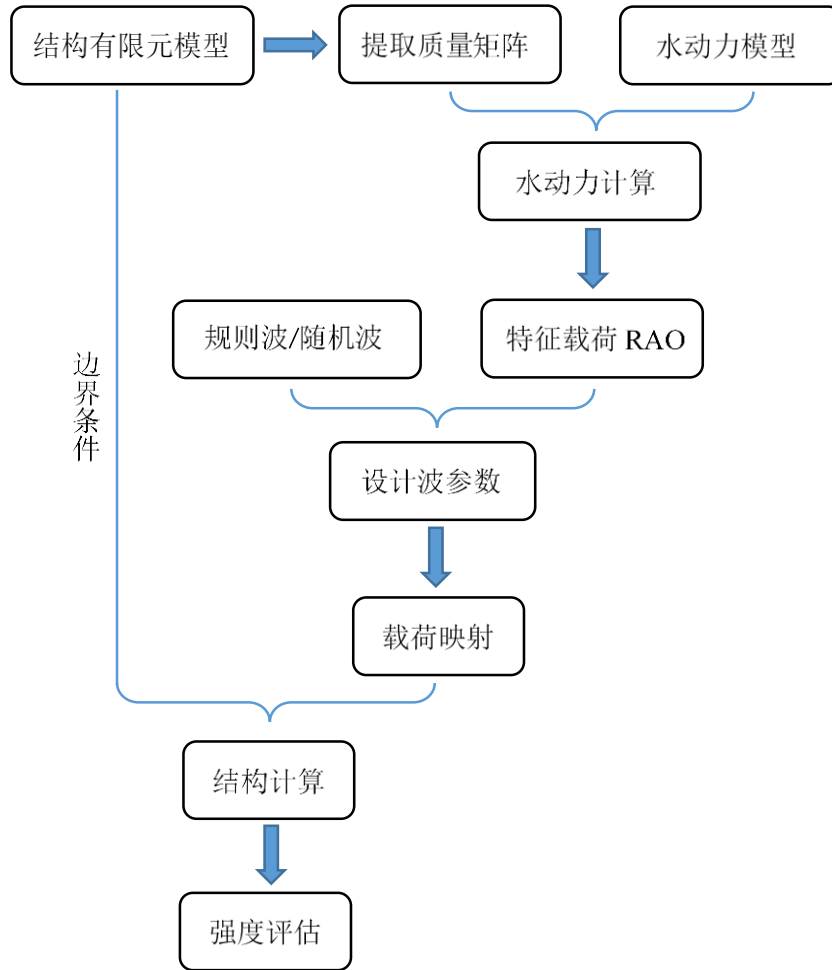


图 1.4.4.1 半潜式平台总体强度评估流程图

1.1.4.2 除上述分析方法外，亦可采用附录 1 的方法进行总体强度评估。

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) 立柱：系指半潜式平台连接上壳体和下壳体的柱形结构。
- (2) 上壳体：系指半潜式平台的上部平台结构。
- (3) 下壳体：系指半潜式平台立柱以下的连续浮体，通常为双下壳体（两个平行的下壳体）或环状下壳体。
- (4) 撑杆：系指在半潜式平台中，将平台各主结构（即上壳体、立柱和下壳体）连接成一个结构整体的圆管状或其他形状的连接构件。
- (5) 操作模式：系指平台在作业点或迁移时进行相关操作或活动的条件或状态，一般包括正常作业模式、自存模式和迁移模式等。
- (6) 波陡：系指波高与波长之比，表征了波面的平均斜率。
- (7) 响应幅值算子：系指响应函数的幅值与输入函数的幅值之比，常简写为 RAO（Response Amplitude Operator）。

第2章 环境条件和载荷

第1节 一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1 半潜式平台的总体强度评估至少包括正常作业模式、迁移模式和自存模式下的典型工况：

(1) 正常作业模式：系指平台在作业点上作业或进行其他操作时承受与作业相适的设计限度内的组合环境载荷和作业载荷的状态；

(2) 迁移模式：系指平台从一个地区迁移到另一个地区时的状态；

(3) 自存模式：系指平台承受最严重设计环境载荷时停止作业或其他操作，从而把抗环境能力提高到最大的状态。

2.1.1.2 应根据平台实际载荷（重力及功能载荷和环境载荷）情况确定平台各种操作模式下的运动响应和载荷。

2.1.1.3 半潜式平台总体强度评估中环境载荷通常只考虑波浪载荷带来的影响。

2.1.1.4 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 环境条件

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 半潜式平台总体强度评估应明确所在海域的波浪条件。

2.2.1.2 根据具体情况，波浪特性可采用以下两种方法描述：规则波方法和基于波浪谱的随机波方法。

2.2.2 规则波

2.2.2.1 规则波参数包括波高和周期。

2.2.2.2 规则波在深水中的波陡 S 可表示为：

$$S = \frac{2\pi H}{gT^2}$$

式中： g ——重力加速度， 9.81m/s^2 ；

H ——规则波波高， m ，一般为平台不同操作模式下对应重现期内的最大波高 H_{\max} ；

T ——规则波周期， s ，为能较为准确的反映最大响应，需要对一系列的周期进行研究。

波陡应小于以下限值：

$$S = \begin{cases} \frac{1}{7} & T \leq 6\text{s} \\ \frac{1}{7 + \frac{0.93}{H_{\max}}(T^2 - 36)} & T > 6\text{s} \end{cases}$$

极限波陡下的波高和周期可表示为：

$$H = \begin{cases} 0.22T^2 & T \leq 6\text{s} \\ \frac{T^2}{4.5 + \frac{0.6}{H_{\max}}(T^2 - 36)} & T > 6\text{s} \end{cases} \quad \text{m}$$

2.2.3 随机波

2.2.3.1 随机波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，波浪谱参数通常包括有义波高和代表性频率或周期（谱峰周期 T_p 或跨零周期 T_z ），有时还需提供谱峰提升因子、平均方向及波浪散布函数等。

2.2.3.2 常用于总体强度评估的波浪谱有 Pierson-Moskowitz 单参谱（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，常应用于恶劣海况时的结构强度评估。工程上通常采用有义波高、谱峰周期和谱峰提升因子为参数的 JONSWAP 谱公式：

$$S_{JS}(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]}$$

式中： α —— 无因次常数， $\alpha \approx \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$ ；

γ —— 谱峰提升因子（ $1 \leq \gamma \leq 7$ ）， $\gamma = 1$ 时即为 P-M 波浪谱，中国主要海域的谱峰提升因子可参考 CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》（2021）附录中相关要求；

f —— 波浪频率，Hz；

H_s —— 有义波高，m；

T_p —— 谱峰周期，s；

σ —— 峰形参数， $f \leq 1/T_p$ ， $\sigma = 0.07$ ； $f > 1/T_p$ ， $\sigma = 0.09$ 。

2.2.3.3 对于 JONSWAP 谱，回归分析得到谱峰周期 T_p 和跨零周期 T_z 的关系：

$$\frac{T_z}{T_p} = 0.6673 + 0.05037\gamma - 0.006230\gamma^2 + 0.000334\gamma^3$$

2.2.3.4 真实的海况下的波面是三维和方向散布的短峰波，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。

2.2.3.5 随机波的波陡可表示为：

$$S_s = \frac{2\pi H_s}{gT_z^2}$$

$$S_p = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2}$$

式中： S_s —— 有义波陡；

S_p —— 谱峰波陡。

对于无限作业区域的平台，随机波的极限波陡（由于波浪破碎导致的）可按如下标准确定：

$$S_s = \begin{cases} \frac{1}{10} & T_z \leq 6s \\ \text{线性插值} & 6s < T_z < 12s \\ \frac{1}{15} & T_z \geq 12s \end{cases}$$

有义波高和跨零周期的关系可表示为:

$$H_s = \begin{cases} \frac{gT_z^2}{20\pi} & T_z \leq 6s \\ \frac{gT_z^2}{15\pi} \left(1 - \frac{T_z}{24}\right) & 6s < T_z < 12s \\ \frac{gT_z^2}{30\pi} & T_z \geq 12s \end{cases} \quad \text{m}$$

2.2.3.6 对于限制作业区域的平台, 随机波参数应采用作业区域的环境条件确定。

第3节 波浪载荷

2.3.1 一般要求

2.3.1.1 半潜式平台应采用势流理论对作用在物体湿表面上整个水动压力的积分计算波浪载荷。对于存在撑杆等结构的半潜式平台, 撑杆等小尺度构件应采用莫里逊 (Morison) 公式计算, 包括拖曳力和惯性力。

2.3.1.2 对某些周期的波浪, 虽然波高小于最大波高, 但可能对结构构件有更大的影响, 亦应予以考虑。

2.3.1.3 频域计算时, 波浪频率和方向的范围应根据波浪环境条件以及平台本身的特性确定。对于非对称结构, 浪向角建议取 $0 \sim 360^\circ$, 间隔建议不小于 30° ; 对于左右舷对称结构, 浪向角建议取 $0 \sim 180^\circ$ 。

2.3.1.4 总体强度评估中的波浪载荷包括: 波浪动压力以及惯性载荷。波浪动压力施加于结构湿表面; 波浪诱导运动引起的惯性载荷通过平台的六自由度的加速度施加。

2.3.2 势流理论

2.3.2.1 基于势流理论, 假定流体是理想、不可压缩的, 且流动无旋。

2.3.2.2 基于势流理论的水动力分析可采用边界元方法求解。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。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, 可采用波浪绕射/辐射理论与莫里逊公式结合的方法。

2.3.2.3 波浪绕射/辐射理论模型可以在频域或时域内求解, 工程设计常采用纯频域方法或频域-时域结合方法。

2.3.2.4 流场中的运动可以用速度势 $\Phi(X, Y, Z, t)$ 描述, 其满足流域内的控制方程—拉普拉斯方程。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。

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

式中: ω ——波浪频率, rad/s;

t ——时间, s;

$\Phi(X, Y, Z, t)$ ——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 ：

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

式中： p ——波浪压力，Mpa；

ρ_w ——海水密度， t/m^3 。

将波浪动压力沿平台平均湿表面上积分可得到作用在平台上的波浪载荷。

2.3.3 莫里逊公式

2.3.3.1 一般以 $D/L \leq 0.2$ (D ：构件截面的特征尺度， L ：波长) 作为小尺度，其波浪载荷应采用莫里逊公式计算，包括拖曳力和惯性力。

2.3.3.2 莫里逊公式的一般形式为：

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

式中： F ——小尺度构件垂直于其轴线方向单位长度上的波浪力，kN/m；

F_D ——单位长度上的拖曳力，kN/m， $F_D = 1/2 \rho_w C_D A |u - \dot{x}|(u - \dot{x})$ ；

F_I ——单位长度上的惯性力，kN/m， $F_I = \rho_w C_A V (\dot{u} - \ddot{x}) + \rho_w V \dot{u} = \rho_w V (C_M \dot{u} - C_A \ddot{x})$

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

ρ_w ——海水密度， t/m^3 ； C_D ——拖曳力系数；

C_A ——附连质量系数；

C_M ——惯性力系数， $C_M = C_A + 1$ ；

V ——单位长度构件的体积， m^3/m ；

u ——垂直于构件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构件方向上的分量；

\dot{u} ——垂直于构件轴线水质点加速度分量， m/s^2 ；

\dot{x} ——垂直于构件轴线构件速度分量，m/s；

\ddot{x} ——垂直于构件轴线构件加速度分量， m/s^2 。

C_D 和 C_M 为经验系数，一般如可能应与波浪运动学理论相配合。在波动流中， C_D 和 C_M 不仅与雷诺数 R_e 和构件表面相对粗糙度有关，还与库尔根—卡培数 K_c 有关。

对圆形构件，可取 $C_D = 0.6 \sim 1.2$ ， $C_M = 1.3 \sim 2.0$ ，且取用的系数值均应不小于上述范围的下限值。对非圆截面的构件，其 C_D 和 C_M 可按公认的文献选取。必要时， C_D 和 C_M 应由试验确定。

注： R_e 数定义为：

$$R_e = D_u / \nu$$

K_c 数定义为：

$$K_c = uT / D$$

式中： u ——垂直于构件轴线水质点速度分量，m/s；

D ——构件特征尺度，m；

T ——波浪周期，s；

ν ——海水运动粘性系数， m^2/s 。

2.3.3.3 浸没在水中撑杆上的拖曳力可根据公认的方法对其线性化(如 Borgman 线性化方法)，并通过模型试验等方式(运动响应 RAO 的一致性)验证线性化的模型的阻尼效应。

第4节 重力及功能载荷

2.4.1 一般要求

2.4.1.1 重力及功能载荷系指在静水条件下由平台重量、使用及作业引起的载荷。重力及功能载荷一般由下列载荷组成：

- (1) 空船重量；
- (2) 油、水、泥浆、存储品等消耗品；
- (3) 钻井和起重作业等载荷，比如：大钩载荷，转盘、立根盒和张紧器载荷等，并考虑生产和处理、储罐等设备的重量；
- (4) 甲板载荷；
- (5) 压载载荷；
- (6) 货物载荷；
- (7) 系泊载荷（适用时）；
- (8) 生产立管载荷（适用时）；
- (9) 海生物、露天结构上积聚的冰/雪载荷（适用时）。

2.4.1.2 对于所有操作模式，重力和功能载荷应取对总体强度影响更不利的组合进行强度以分析。

第3章 设计波法

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 半潜式平台波浪载荷预报通常采用设计波法。

3.1.1.2 设计波法即选取一个确定的波浪（包括波高和周期），以一定的方向和相位作用于平台上，使得在该设计波（波浪载荷）作用下的平台结构响应能够表征实际平台作业过程中的最不利承载状态。

第2节 随机性设计波法

3.2.1 一般要求

3.2.1.1 随机性设计波法的环境参数应按本指南第2章 2.2.3 选取。

3.2.2 随机性设计波法流程

3.2.2.1 随机性设计波法流程为：

- (1) 结合平台的布置与结构形式特点，选取控制平台总体强度的特征载荷；
- (2) 根据平台的几何形状以及特征载荷特性，确定设计波波长（或周期）和浪向；
- (3) 计算不同浪向和波浪频率的特征载荷的 RAO；
- (4) 基于本指南第2章 2.2.3 中规定的波浪谱 $S(\omega)$ 和特征载荷 RAO，得到特征载荷响应最大值；

$$R_d(\text{Max}) = 2\sqrt{m_0} \times \sqrt{-0.5 \ln \left(1 - p^{\frac{1}{N}} \right)}$$

式中： m_0 ——特征载荷响应谱的 0 阶谱矩；

p ——置信水平， p 取 90%；

N ——波浪数，波浪持续时间一般取 3 小时：

$$N = \frac{3 \times 3600}{T_m}$$

T_m ——特征载荷响应的跨零周期，s， $T_m = 2\pi\sqrt{m_0/m_2}$ ， m_2 为特征载荷响应谱的 2 阶

谱矩， $m_2 = \int_0^\infty \omega^2 |RAO(\omega)|^2 S_s(\omega) d\omega$ ；

- (5) 设计波波幅根据 RAO 在设计波周期下的值和特征载荷响应最大值计算得到：

$$A_d = \frac{R_d(\text{Max})}{RAO_d} \quad \text{m}$$

式中： A_d ——设计波波幅，m；

RAO_d ——特征载荷 RAO 在设计波周期下的值。

- (6) 特征载荷 RAO 在设计波周期对应的相位以及其反向相位为设计波的相位；

(7) 根据上述特征载荷的设计波参数（波幅、周期、相位和浪向）得到用于总体强度评估的波浪载荷。

3.2.3 随机波下的短期极值预报

3.2.3.1 RAO 结合特定海域的波浪谱，可得到响应谱：

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S_s(\omega)$$

式中： $S_R(\omega)$ ——平台运动或载荷的响应谱；

平台运动或载荷幅值的短期响应服从瑞利分布：

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right\} = \frac{x}{\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\}$$

式中： x ——研究的变量；

σ ——标准差；

σ^2 ——方差。

方差 σ^2 可根据响应谱得到，

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega = \int_0^\infty [RAO(\omega)]^2 S_s(\omega) d\omega$$

式中： m_0 ——响应谱的零阶谱矩。

短期响应的有义值 $R_{1/3}$ 可表达为：

$$R_{1/3} = 2\sqrt{m_0}$$

第3节 确定性设计波法

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 确定性设计波法的环境参数应按本指南第2章2.2.2选取。

3.3.2 确定性设计波法流程

3.3.2.1 确定性设计波法流程为：

- (1) 结合平台的布置与结构形式特点，选取控制平台总体强度的特征载荷；
- (2) 计算不同浪向角和波浪频率的特征载荷RAO；
- (3) 根据第2章2.2.2中规定的规则波计算不同波浪周期（至少涵盖3~20s的范围）对应的极限波高；
- (4) 基于特征载荷RAO和(3)中不同周期下的极限波高，得到特征载荷响应值；
- (5) 基于(4)中计算得到的最大响应对应的规则波波高和周期即为设计波波高和周期，浪向和相位由对应的最大RAO确定；
- (6) 根据上述特征载荷的设计波参数（波幅、周期、相位和浪向）得到用于总体强度评估的波浪载荷。

第4节 特征载荷

3.4.1 一般要求

3.4.1.1 需选取合适的特征载荷以确保作用于平台结构上的载荷组合能够涵盖平台实际可能存在的最危险状态。

3.4.1.2 特征载荷至少包含下壳体间的分离力与纵向剪切力、扭矩、垂向弯矩和上壳体中心横向与纵向加速度。必要时，并根据实际情况考虑其他特征载荷和多特征载荷联合作用的影响。

3.4.2 特征载荷

3.4.2.1 下壳体间的分离力

下壳体间的分离力最大值一般出现在横浪状态，波长(L_w)约等于下壳体外侧间宽度(B)的两倍，如图3.4.2.1所示。双下壳体平台的下壳体间横向构件将受到最大的轴向力，若平

台无横向结构和撑杆结构，甲板与立柱的连接部分将存在最大的弯矩。对有撑杆结构的典型双下壳体平台，除轴向力外，作用于撑杆结构的拖曳力和惯性力也应予以考虑。

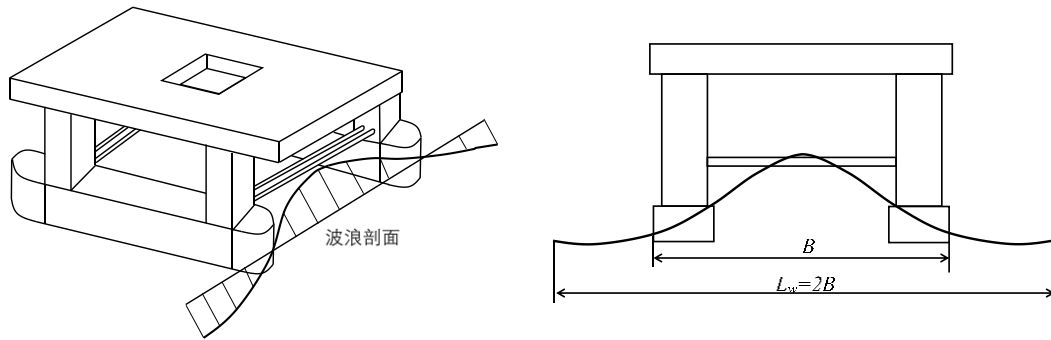


图 3.4.2.1 下壳体间的分离力

3.4.2.2 下壳体间的纵向剪切力

下壳体间的纵向剪切力的最大值一般出现在斜浪状态，波长约等于下壳体两端对角线长 (D) 的 1.5 倍，如图 3.4.2.2 所示。对有撑杆结构的典型双下壳体平台，作用于撑杆结构的拖曳力和惯性力应予以考虑。

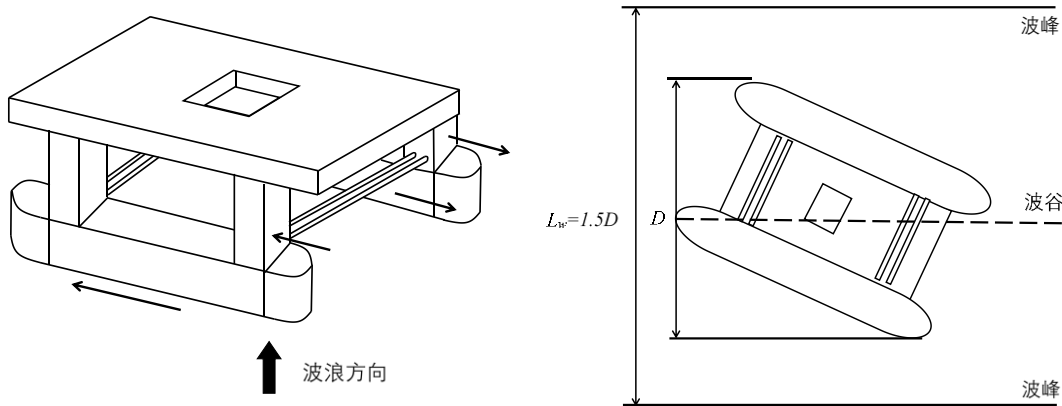


图 3.4.2.2 下壳体间的纵向剪力

3.4.2.3 扭矩

扭矩的最大值一般出现在斜浪状态，波长约等于下壳体两端对角线长，如图 3.4.2.3 所示。对有撑杆结构的典型双下壳体平台，斜撑结构将承受较大的轴向力，应加以校核和考虑，并考虑作用于撑杆结构的拖曳力和惯性力。

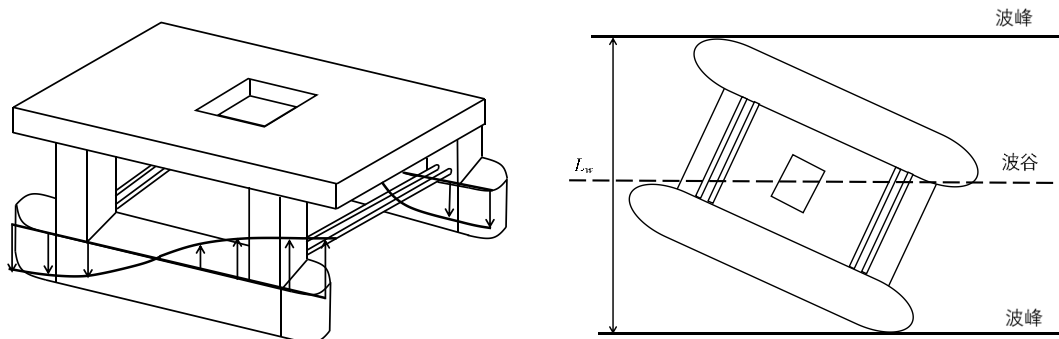


图 3.4.2.3 扭矩

3.4.2.4 下壳体上的垂向弯矩

垂向弯矩的最大值一般出现在迎浪或斜浪状态，波长约等于下壳体长，如图 3.4.2.4 所

示。下壳体处于中拱或中垂状态，下壳体结构响应较大。每个下壳体只有两个立柱的平台，弯矩的峰值将出现在下壳体中间部位，弯矩值成对称分布；每个下壳体具有三个或者更多立柱的平台，弯矩的峰值将出现在中间立柱处，最小值将出现在立柱之间，且成不对称分布，如图 3.4.2.4-2 所示。

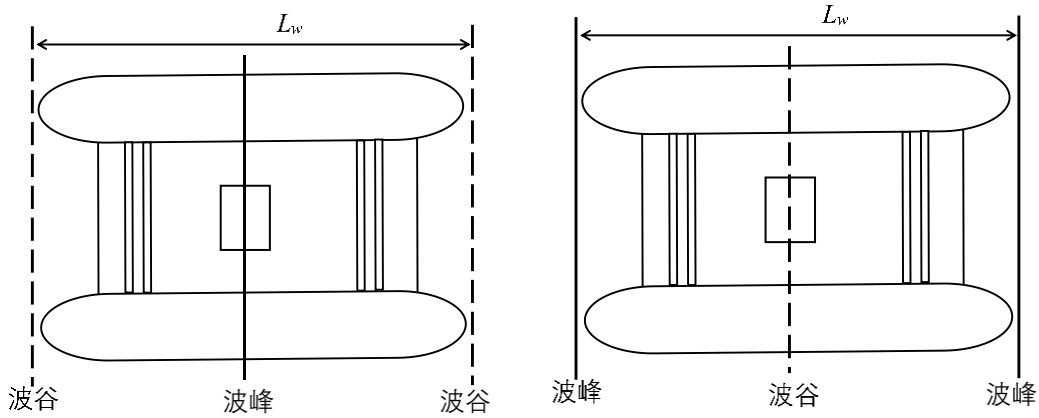


图 3.4.2.4 垂向弯矩

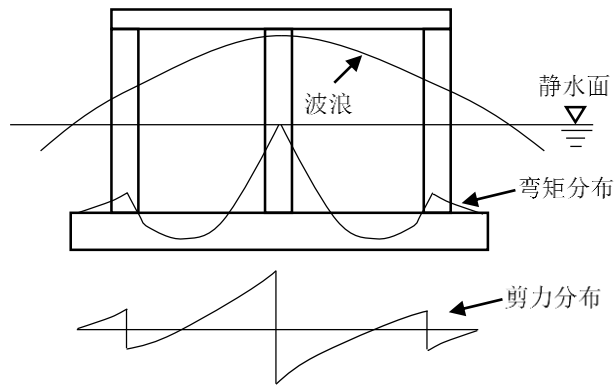


图 3.4.2.4-2 垂向波浪弯矩分布

3.4.2.5 上壳体中心纵向加速度

上壳体中心纵向加速度的最大值一般出现在迎浪状态，此时立柱与甲板、立柱和下壳体的连接处将产生较大的剪切力和相应的弯矩，如图 3.4.2.5 所示。

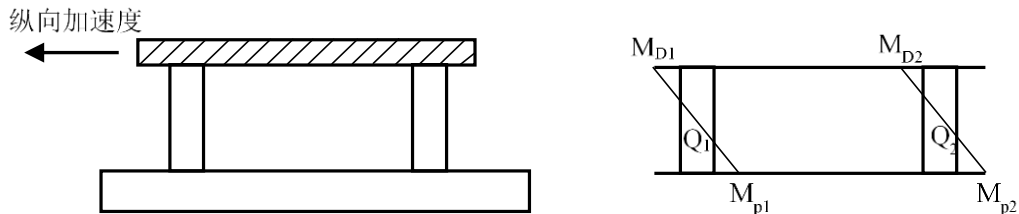


图 3.4.2.5 纵向加速度

3.4.2.6 上壳体中心横向加速度

上壳体中心横向加速度的最大值一般出现在横浪，通常发生在平台吃水较小的工况。上壳体和下壳体之间的剪切力将会以两种方式在平台结构间传递：

(1) 对有斜撑结构的平台，剪切力可以转变为斜撑的轴向力和立柱上的弯矩。构件中响应所占比例主要依据构件自身的刚度而定；

(2) 对无斜撑结构的平台，立柱与上壳体、立柱与下壳体的连接处将有较大的剪切力和相应的弯矩。

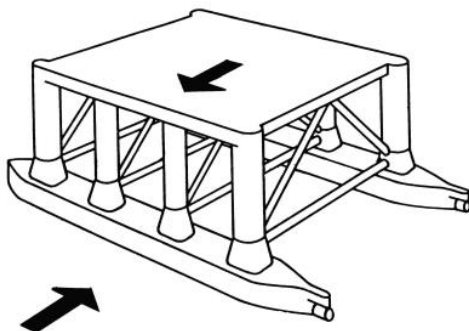


图 3.4.2.6 横向加速度

第4章 总体强度评估

第1节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 总体强度评估应基于有限元模型进行分析。

4.1.1.2 总体强度评估的载荷包括静载荷(重力及功能载荷和静水压力等)和动载荷(波浪动压力以及惯性载荷等)。

第2节 结构分析模型

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 有限元分析通常使用的单元类型如表 4.2.1.1 所示。

单元类型

表 4.2.1.1

梁单元	具有轴向、扭转、双向剪切和弯曲刚度，且沿单元长度其特性不变。
壳单元	具有面外和面内刚度，且厚度不变。
杆单元	只承受杆轴向拉压，不承受弯矩。
质量单元	具有六个自由度，每个坐标方向可以具有不同的质量和转动惯量。

4.2.1.2 结构模型应尽可能真实的反映结构的实际刚度、质量分布和载荷情况。

4.2.2 建模原则

4.2.2.1 用三维结构有限元模型进行平台主要构件的总体强度评估时，模型范围应包括下壳体、立柱和上壳体的所有主要结构构件。

4.2.2.2 总体结构模型通常包括：外板及其内部纵向和横向舱壁，立柱外板及其内部甲板、舱壁和主要围壁，甲板结构中的主要舱壁、框架和各层甲板、双下壳体平台的撑杆结构和下壳体，立柱及甲板结构中的各种加强筋和桁材等。

4.2.2.3 结构有限元模型网格横向按纵骨间距进行划分，纵向按肋骨间距划分，如肋骨间距较纵骨间距偏大，则同样按纵骨间距进行划分，网格形状应尽量接近正方形。

4.2.2.4 平台的外板、水密舱壁、甲板平板、强框架和主要横梁及型材的腹板等结构通常采用 4 节点壳单元模拟。局部区域可以采用三角形单元进行过渡，但在高应力区和高应力变化区应尽可能避免使用三角形单元。所有类型的单元应严格控制单元边长比和角度以减少由于单元质量问题带来的误差。

4.2.2.5 平台结构中的各类板材上的加强筋和尺寸较小的型材采用梁单元模拟，并考虑偏心的影响。桁材及肋板上的加强筋、肋骨和肘板等主要构件的面板及加强筋可用梁/杆单元模拟。

4.2.2.6 槽形舱壁的每一个翼板和腹板至少应划分为一个板单元。若考虑结构布置和大小划分的困难，槽形舱壁可以简化为直角舱壁，但必须给出充分说明。

4.2.2.7 板单元的长宽比通常不超过 3，槽型舱壁板单元的长宽比应不超过 2，在高应力区和高应力变化区板单元的长宽比应尽可能接近 1。

4.2.2.8 对于结构关键区域的开孔，网格应能反映开孔形状。

4.2.2.9 新建平台的结构尺寸采用原始的建造尺寸。对于已经服役的平台，结构尺寸宜

采用最近一次的测厚报告所提供的尺寸。

4.2.2.10 对于桁架式上部组块，桁架可采用梁单元模拟，甲板可采用壳单元模拟，设备等集中质量可采用质量点模拟，模型应能真实的反映上部模块的刚度和质量。

4.2.3 质量模型

4.2.3.1 质量模型用于模拟每个装载工况下的质量分布，通常为一个独立的模型或包含在结构模型中。

4.2.3.2 上层建筑和设备等大构件重量，可采用集中质量点的方法来模拟。若上层建筑对总体刚度有显著贡献，则需要建立有限元模型。

4.2.3.3 舾装管路等小构件重量，可采用分区密度调整方法来模拟。

4.2.3.4 质量分布应严格按照实际工况模拟，并按照重量控制数据进行重量调平，建议采用分布质量以降低应力集中，并考虑惯量的影响。

第3节 载荷加载与边界条件

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 平台静水压力以及所受波浪载荷以湿表面压力的形式施加到结构有限元模型。

4.3.1.2 因加速度引起的平台结构、设备及上部模块自身的惯性力可采用质量点或集中力的方式施加到结构有限元模型上。

4.3.1.3 压载舱等液舱加速度引起的载荷通过压力施加到结构有限元模型。

4.3.1.4 应确保静载荷、动载荷、惯性载荷施加到结构有限元模型时，模型受力情况接近平衡状态，即应满足：迎浪状态，所受总合力不超过对应平台排水重量的1%；横浪及斜浪状态，所受总合力应不超过对应平台排水重量的2%。

4.3.1.5 满足4.3.1.4中所述的整体不平衡力条件后，可采用惯性释放的方法进行平衡，或采用4.3.1.6推荐的边界条件。

4.3.1.6 为消除平台整体结构的刚体位移，模型中至少需要施加6个自由度的静定约束。根据平台的实际情况，位移边界条件可以是弹性固定或刚性固定。

(1) 对于刚性固定边界条件，通常应选取结构强度较大且远离结构强度评估区域的3个不共线的节点，每个节点施加相应的位移边界条件。图4.3.1.6给出了一组刚性固定边界条件，3个垂向约束（Z），2个横向水平约束（Y），1个纵向水平约束（X），约束点可以设置在下壳体角端。

(2) 对于弹性固定边界条件，垂向约束（Z）的刚度可根据水线面的面积进行确定，横向和纵向水平约束的刚度可根据系泊系统的水平刚度进行确定。

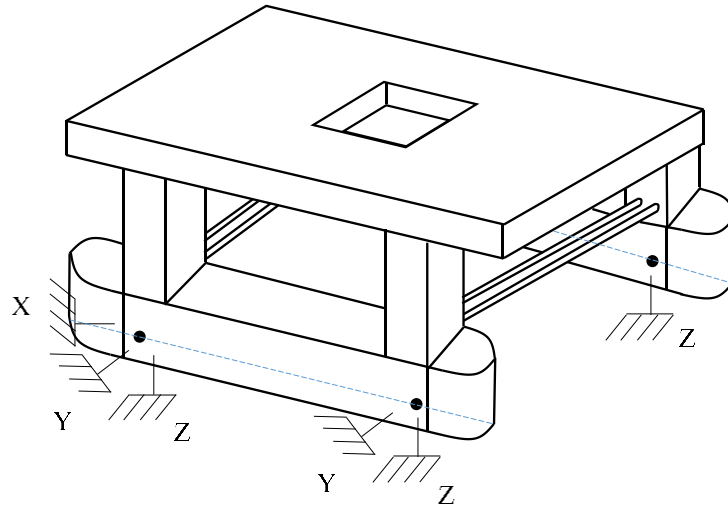


图 4.3.1.6 边界条件

4.3.1.7 若质量点通过多点约束连接到结构上，应避免多点约束引起的应力失真。

第4节 半潜式移动平台强度校核衡准

4.4.1 一般要求

4.4.1.1 应按最不利的应力/应力组合值进行强度校核。

4.4.1.2 对于所考虑的载荷工况，应计算确定下列应力类型，且应不大于 4.4.2 所要求的许用应力值：

(1) 静载应力——仅由静载荷引起的应力，其载荷包括平台作业重力载荷和处于漂浮状态时的自身重量以及相对应的浮力，所对应的工况称为静载工况；

(2) 组合应力——由组合载荷引起的应力，其载荷包括(1)中的适用静载与相应的设计环境载荷的组合，并包括由加速度和倾斜引起的载荷，所对应的工况称为组合工况。

4.4.2 屈服校核

4.4.2.1 壳单元采用单元中面平均应力，梁单元采用轴向应力。

4.4.2.2 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 $[\sigma]$ ：

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

式中： σ_s ——材料的屈服强度， N/mm^2 ；

q ——安全系数，按表 4.4.2.2 取用。

安全系数

表 4.4.2.2

应力类型	安全系数	
	静载工况	组合工况
轴向或弯曲应力	1.67	1.25
剪切应力	2.50	1.88

4.4.2.3 对于板材，取其等效应力 σ_{eqv} 进行强度评估：

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{eqv} \leq [\sigma]$$

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

式中： σ_{eqv} ——等效应力，N/mm²，取板单元形心处的中面应力值计入；

σ_x ——沿 x 方向的应力，N/mm²；

σ_y ——沿 y 方向的应力，N/mm²；

τ_{xy} ——单元 xy 平面的剪切应力，N/mm²；

σ_s ——材料的屈服强度，N/mm²；

q ——安全系数，按表 4.4.2.3 选取，对于结构不连续处所产生的高应力值一般可按 4.4.2.4 考虑。

等效应力安全系数

表 4.4.2.3

静载工况	组合工况
1.43	1.11

4.4.2.4 局部高应力区屈服失效准则

(1) 板材应力计算应计及切口、应力增高和局部应力集中效应的影响。当由于结构不连续造成很大的应力梯度，而引起的高应力区集中于某几个单元时，其许用应力可给予特殊考虑。对于采用细网格有限元分析（高应力区域的网格尺寸为 50mm×50mm），其等效应力按下式校核：

$$\sigma_{eqv} \leq C\sigma_{yd}$$

式中： C ——系数，按下式计算：

$$C = \begin{cases} 1.0 & \text{对于静载工况} \\ 1.286 & \text{对于组合工况} \end{cases}$$

σ_{yd} ——规定的材料应力，N/mm²，按表 4.4.2.4 选取。

局部高应力校核中不同材料的 σ_{yd} 值

表 4.4.2.4

材料屈服强度 (N/mm ²)	静载工况	组合工况，且未对局部高应力点进行详细疲劳分析	组合工况，且对局部高应力点进行详细疲劳分析，结果满足要求
235	235	235	235
265	259	259	259
315	301	301	301
355	326	301	312
390	346	301	331
420	346	301	346
460	368	301	368
500	400	301	400

(2) 由细化网格分析得到的，面积相当于粗网格整体有限元模型一个网格大小（一般以一个骨材间距为基本单位）的细化网格 Von Mises 应力计算结果的平均值应不超过 4.4.2.3 规定的许用值。

(3) 如使用更小网格尺寸，可使用与上述网格尺寸相当面积上的单元平均等效应力与许用应力作比较。计算平均应力时，仅当单元的所有边界都在上述网格尺寸区域内才计入。

平均应力的计算基于单元形心处应力，不使用内插法和/或外推法得到应力值。平均等效应力应基于单元面积进行加权计算：

$$\sigma_{vm-av} = \frac{\sum_1^n A_i \sigma_{vm-i}}{\sum_1^n A_i} \quad \text{N/mm}^2$$

式中： σ_{vm-av} ——单元平均等效应力，N/mm²；

σ_{vm-i} ——考虑区域内第*i*个板单元的等效应力，N/mm²，与4.4.2.3中取值方法相同；

A_i ——考虑区域内第*i*个板单元的面积，mm²；

n ——考虑区域内的单元的个数。

(4) 对于上述局部应力集中区域，应保证其具有足够的疲劳强度。

4.4.2.5 管节点特殊考虑

对于采用梁单元模拟的桁架式结构，可按照SY/T 10030—2018《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法工作应力设计法》第7节的要求校核管节点的连接强度。也可以采用壳单元细化建模，校核管节点的屈服强度。

4.4.3 屈曲校核

4.4.3.1 半潜式移动平台屈曲强度校核应满足CCS《海上移动平台入级规范》(2023)第2篇第3章3.4.3~3.4.8的相关要求。

4.4.4 疲劳校核

4.4.4.1 半潜式移动平台疲劳强度校核应满足CCS《海上移动平台入级规范》(2023)第2篇第3章第5节的相关要求。

4.4.5 结构冗余度

4.4.5.1 半潜式移动平台结构冗余度应满足CCS《海上移动平台入级规范》(2023)第2篇第5章第8节的相关要求。

第5节 半潜式浮动设施强度校核衡准

4.5.1 一般要求

4.5.1.1 应按最不利的应力/应力组合值进行强度校核。

4.5.2 屈服校核

4.5.2.1 半潜式浮动设施的屈服失效准则可参考4.4.2中半潜式移动平台的屈服失效准则，其安全系数按照表4.5.2.1选取。

安全系数

表 4.5.2.1

应力类型	梁单元		壳单元
	轴向或弯曲应力	剪切应力	
迁移模式	1.25	1.88	1.11
正常作业模式	1.67	2.50	1.43
自存模式	1.25	1.88	1.11

4.5.2.2 半潜式浮动设施的局部高应力区屈服失效准则与半潜式移动平台相似，4.4.2.4中的系数*C*按照下述选取：

- (1) *C*取0.97，对于正常作业模式；
- (2) *C*取1.25，对于迁移和自存模式。

对于规定的材料应力，按表 4.4.2.4 中组合工况选取。

4.5.3 屈曲校核

4.5.3.1 半潜式浮动设施的屈曲校核应满足 CCS《海洋工程结构物屈曲强度评估技术指南》的相关要求。

4.5.4 疲劳校核

4.5.4.1 半潜式浮动设施的疲劳校核应满足 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》的相关要求。

4.5.5 结构冗余度

4.5.5.1 半潜式浮动设施的结构冗余度应满足 CCS《海上移动平台入级规范》(2023) 第 2 篇第 5 章第 8 节的相关要求。

附录 1 设计波全相位最大应力计算方法

第 1 节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 设计波全相位最大应力计算方法，是指采用特定设计波下波浪实部虚部响应叠加的方法，计算多个相位的有限元单元的最大应力值，相较于本指南第 3 章所述的设计波方法，能更为严谨地考虑不同相位下的有限元单元应力最大响应值。

1.1.1.2 设计波参数可根据选择的设计波方法确定，如采用随机设计波法，波高和浪向按照本指南 3.2.2.1 计算获得。如采用确定性设计波法，波高和浪向按照 3.3.2.1 确定。

第 2 节 计算方法及原理

1.2.1 一般要求

1.2.1.1 波浪实部响应是指在设计波波浪实部载荷产生的结构响应；波浪虚部响应是指在波浪虚部载荷产生的结构响应。静水响应是指平台在静水载荷下的结构响应。

1.2.1.2 完整波浪周期内不同相位的最大应力通过静水响应、波浪实部响应和波浪虚部响应叠加得到。

1.2.2 计算流程

1.2.2.1 设计波周期最大应力计算方法的流程如下：

- (1) 根据第 2 章 2.2.2 或 2.2.3 中规定确定设计波的波高、周期和浪向；
- (2) 计算设计波下的实部响应、虚部响应以及对应装载下的静水响应；
- (3) 根据本附录 1.2.3 公式计算不同相位下有限元单元的应力值；
- (4) 统计不同有限元单元的等效力极值及相位。

1.2.3 有限元单元的应力值计算方法

1.2.3.1 相移为输出的正弦波和输入的正弦波信号的相位差。

1.2.3.2 对于规则波，若 R 表示实部响应值， I 表示虚部响应值，则响应的相移为：

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I}{R}\right)$$

响应幅值为：

$$M = \sqrt{R^2 + I^2}$$

对于波浪入射的某一时刻 t ，响应值为：

$$F(\omega t) = R \cos(\omega t) - I \sin(\omega t)$$

式中： ω ——角频率， $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ ，rad/s。

t ——时间，s。

1.2.3.3 对于海洋工程常用的壳单元，其应力基本分量 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ 具有方向性，可以表达为如下形式：

$$\begin{cases} (\sigma_x)_\theta = (\sigma_x)_s + (\sigma_x)_r \cos(\theta) - (\sigma_x)_i \sin(\theta) \\ (\sigma_y)_\theta = (\sigma_y)_s + (\sigma_y)_r \cos(\theta) - (\sigma_y)_i \sin(\theta) \\ (\tau_{xy})_\theta = (\tau_{xy})_s + (\tau_{xy})_r \cos(\theta) - (\tau_{xy})_i \sin(\theta) \end{cases}$$

式中： σ_x —— x 方向的应力， N/mm^2 ；

σ_y —— y 方向的应力， N/mm^2 ；

τ_{xy} ——剪切应力， N/mm^2 ；

θ ——计算的某一相位；

s ——下角标，静水工况；

r ——下角标，实部工况；

i ——下角标，虚部工况。

1.2.3.4 组合后的不同相位下的等效应力 $(\sigma_v)_\theta$ 可以表示为：

$$(\sigma_v)_\theta = f(\theta) = \sqrt{(\sigma_x)_\theta^2 + (\sigma_y)_\theta^2 - (\sigma_x)_\theta (\sigma_y)_\theta + 3(\tau_{xy})_\theta^2}$$

θ 一般按照不超过 10 度间隔选择多个不同的相位，找出等效应力的最大应力值和对应的相位。