指导性文件
GD031-2026

中　国　船　级　社

基于粘流的船舶非线性波浪载荷计算指南

2026

2026 年 10 月 1 日生效

北　京

目 录

第 1 章 通则 1
第 1 节 一般规定 1
1.1.1 一般要求 1
1.1.2 其他 1
第 2 节 定义 2
1.2.1 一般要求 2
1.2.2 主要符号定义 2
1.2.3 坐标系定义 2
1.2.4 计算流体力学相关定义 3
第 3 节 图纸资料 5
1.3.1 一般要求 5
第 2 章 粘流数值计算方法 6
第 1 节 一般规定 6
2.1.1 一般要求 6
第 2 节 控制方程 6
2.2.1 连续性方程（质量守恒定律） 6
2.2.2 湍流模型 7
2.2.3 雷诺应力封闭假设 7
第 3 节 VOF 自由面 8
2.3.1 一般要求 8
2.3.2 水相体积分数α 8
2.3.3 水相质量的变化率 9
2.3.4 其他 10
第 4 节 六自由度刚体运动 10
2.4.1 一般要求 10
2.4.2 平动运动方程 10
2.4.3 转动运动方程 11
第 5 节 数值造波与消波理论 11
2.5.1 一般要求 11
2.5.2 线性波浪（Airy 波） 12

2.5.3 非线性波浪（五阶 Stokes 波） 12
2.5.4 不规则波 13
第 3 章 船舶非线性波浪载荷直接计算 15
第 1 节 一般规定 15
3.1.1 一般要求 15
第 2 节 计算几何模型及设置 16
3.2.1 计算几何模型 16
3.2.2 计算域设置 16
第 3 节 网格划分及验证 18
3.3.1 网格划分一般原则 18
3.3.2 网格质量要求 18
3.3.3 网格收敛性验证 18
第 4 节 计算工况设定 19
3.4.1 一般要求 19
3.4.2 装载工况 19
3.4.3 规则波计算工况 19
3.4.4 不规则波计算工况 20
第 5 节 求解设定 20
3.5.1 一般要求 20
3.5.2 边界条件设置 20
3.5.3 时间步长设置 21
3.5.4 湍流模型 21
3.5.5 求解收敛准则 21
3.5.6 监测点设置 21
第 6 节 波浪载荷输出 22
3.6.1 一般要求 22
3.6.2 水动压力 22
3.6.3 水动压力引起的力和力矩 22
3.6.4 运动及加速度 23
3.6.5 船体梁波浪载荷 23

第 1 章　通则

第 1 节　一般规定

1.1.1　一般要求

1.1.1.1　本指南规定了基于粘流计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，以下简称“CFD”）的船舶非线性波浪载荷直接计算方法。

1.1.1.2　本指南适用于中国船级社（以下简称“CCS”）规范或指南要求进行非线性波浪载荷直接计算的船型，包括散货船、油船、矿砂船、集装箱船、液化气体运输船、邮轮等。

1.1.1.3　本指南基于船体为刚体的假设条件，使用不可压缩状态的自由面流动模拟，其介质为水和空气，一般不考虑风、流的影响。

1.1.1.4　本指南适用于以下波浪载荷分量的计算：

（1）船体梁波浪载荷；

（2）船体运动；

（3）船体外壳水动压力；

（4）砰击压力；

（5）上浪压力。

1.1.1.5　本指南基于雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程的粘流 CFD 方法，可考虑的物理现象包括：

（1）粘性效应与边界层流动；

（2）自由面液面流动；

（3）波浪破碎与飞溅；

（4）船波间的强相互作用。

1.1.2　其他

1.1.2.1　不同于本指南要求的船舶非线性波浪载荷计算方法，如能提供相应的理论依据、模型试验验证或公认标准，也可以作为替代，但应经 CCS 同意。

第 2 节　定义

1.2.1　一般要求

1.2.1.1　除另有规定外，本指南中船舶主尺度和主要参数定义如下：

（1）船长 L（m）：参照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节 1.1.2.1 定义内容。

（2）船宽 B（m）：参照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节 1.1.2.2 定义内容。

（3）结构吃水 d（m）：参照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节 1.1.2.4 定义内容。

（4）方形系数 C_b：参照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节 1.1.2.5 定义内容。

（5）航速 V（m/s）：参照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 1 节 1.1.2.27 定义内容。

1.2.2　主要符号定义

1.2.2.1　除另有规定外，本指南中主要符号定义如表 1.2.2.1 所示：

主要符号定义　　表 1.2.2.1

符号名称	含义	单位
Fr	傅汝德数，$Fr=V/\sqrt{gL}$	-
Re	雷诺数，$Re=VL/v$	-
λ	波长	m
H	波高	m
k	波数，$k=2\pi/\lambda$	rad/m
ω	波浪圆频率，$\omega=2\pi/T$	rad/s
ρ	流体密度	kg/m³
v	水的运动粘性系数	m²/s
M_y	垂向波浪弯矩	Nm
M_z	水平波浪弯矩	Nm
M_x	波浪扭矩	Nm
Q_z	垂向波浪剪力	N
Q_y	水平波浪剪力	N
Q_x	纵向波浪剪力	N

1.2.3　坐标系定义

1.2.3.1　除非另有说明，本指南采用如图 1.2.3.1 的右手笛卡尔坐标系：

原点（AE）：船舶中纵剖面、船长 L 尾端和基线的相交处；

X 轴：纵向轴，由船尾指向船首为正，m；

Y 轴：横向轴，由右舷指向左舷为正，m；

Z 轴：垂向轴，由基线向上为正，m。

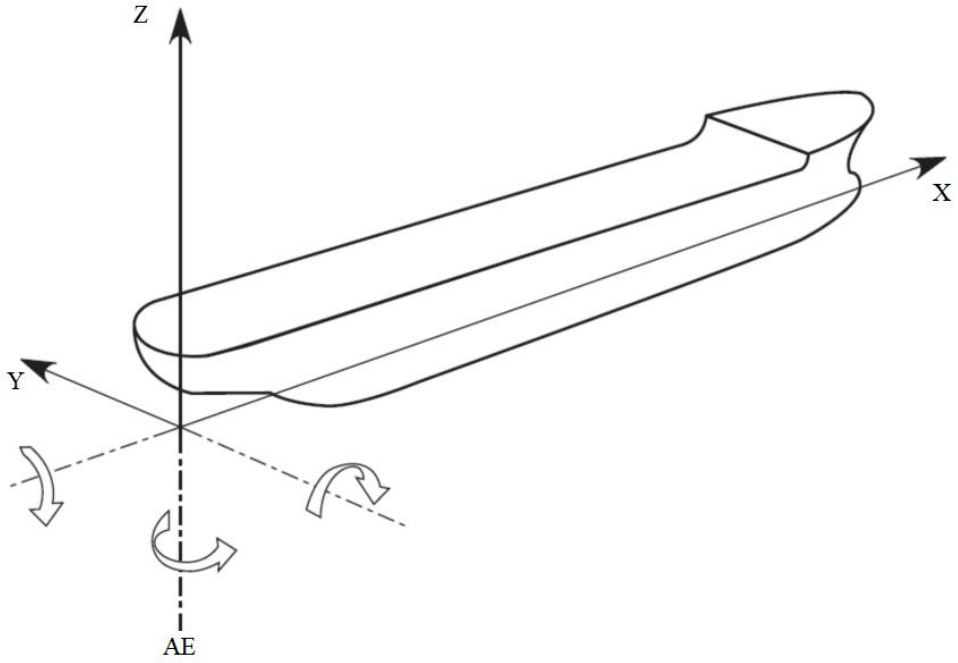


图 1.2.3.1　坐标系定义

1.2.4　计算流体力学相关定义

1.2.4.1　雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程：将瞬态 Navier-Stokes 方程对时间进行平均，按下式的控制方程组得到描述湍流时均运动（不可压牛顿流体）：

$$\rho\overline{u}_j\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial^2\overline{u}_i}{\partial x_j\partial x_j}-\rho\frac{\partial\overline{u_i'u_j'}}{\partial x_j}+\rho f_i$$

式中：$\overline{u}_i$——时均速度分量，m/s；

ρ——流体密度，kg/m^3；

$\overline{u}_i,\overline{u}_j$——时均速度分量（$i$，$j$=1，2，3，对应 x，y，z 方向），m/s；

$\overline{p}$——时均静压，Pa；

μ——流体动力粘度，Pa·s；

x_i,x_j——流体动力粘度空间坐标分量（i，j=1，2，3，对应 x，y，z 方向），m；

f_i——单位质量流体所受体积力分量，m/s^2；

$\overline{u_i'u_j'}$——雷诺应力项，Pa。

1.2.4.2　体积分数法（VOF）：系指通过求解一组动量方程并跟踪每一相在计算区域内的体积分数，以模拟两个或多个不混溶流体的方法。

1.2.4.3　y^+值：系指无量纲壁面距离，按下式得到，用于评估边界层网格分辨率：

$$y^+=\frac{yu_\tau}{v}$$

式中：y——第一层网格节点到壁面的距离；

u_τ——摩擦速度，$u_\tau=\sqrt{\tau_w/\rho}$。其中，$\tau_w$为壁面剪切应力，$\rho$为流体密度。

对于低雷诺数湍流模型，要求 $y^+\approx1$；对于壁面函数法，要求 $30<y^+<100$。

1.2.4.4　雷诺数（Re）：表征流场流动状态的无量纲数，采用下式计算：

$$Re=\frac{VL}{v}$$

式中：v——水的运动粘性系数，m²/s，25℃时参考值为 0.89×10^{-6} m²/s。

1.2.4.5　傅汝德数（Fr）：按下式表征船舶航行兴波状态的无量纲数：

$$Fr=\frac{V}{\sqrt{gL}}$$

式中：g——重力加速度，取为 9.81 m/s²。

1.2.4.6　湍流模型：除 RANS 方程外，用于使方程封闭而增加的其他微分方程。湍流模型可根据微分方程的个数分为零方程模型、一方程模型、两方程模型和多方程模型。

1.2.4.7　边界条件：在船舶水动力计算过程中，通常在计算域四周及船体表面设置边界条件。常用边界条件一般包括：

（1）速度入口：指定流速分布和流体属性；

（2）压力出口：指定出口压力条件；

（3）对称边界：法向速度为零，其他变量梯度为零；

（4）固壁条件：不可渗透表面，满足无滑移或滑移条件。

1.2.4.8　重叠网格（动态网格）：重叠网格技术是一种通过在一个区域的受体网格单元与另一个区域的供体网格单元（即标记为活动的网格单元）之间交换数据来耦合区域的方法。典型的重叠模拟将整个求解域作为背景区域以及将围绕刚体（如船体）的区域作为重叠区域。重叠区域的外表面定义为重叠边界。

1.2.4.9　自由度：船体在波浪中运动主要有纵荡（Surge）、横荡（Sway）、垂荡（Heave）、横摇（Roll）、纵摇（Pitch）、首摇（Yaw）共 6 个自由度（6 DOF）。

第 3 节　图纸资料

1.3.1　一般要求

1.3.1.1　本指南参考的图纸/资料包括但不限于：

（1）型线图及型值表；

（2）肋骨型线图；

（3）舭龙骨结构图与布置图；

（4）总布置图；

（5）外板展开图；

（6）舱容图；

（7）静水力计算书；

（8）装载手册（包含分段质量、重心等）；

（9）典型横剖面图；

（10）计算数据文件（含网格、计算结果及后处理）；

（11）三维几何模型数据库。

第 2 章　粘流数值计算方法

第 1 节　一般规定

2.1.1　一般要求

2.1.1.1　本章给出了基于粘流的数值计算方法的基本原理。主要从质量守恒、动量守恒、自由面捕捉、流固耦合计算等方面进行理论阐释。

2.1.1.2　船舶在波浪中运动及波浪载荷的粘流计算，本质是求解非定常、粘性、多相流场与刚体运动的耦合方程组。

2.1.1.3　针对粘流计算问题，求解一般采用有限体积法离散控制方程，核心方程组一般包括：不可压缩流体连续性方程、RANS 动量方程、VOF 自由面追踪方程及六自由度（6 DOF）刚体运动方程。

第 2 节　控制方程

2.2.1　连续性方程（质量守恒定律）

2.2.1.1　对于船舶波浪运动模拟，流体可视为不可压缩流体（流体密度ρ为常数），其质量守恒的核心是：控制体内流体质量的变化率等于通过控制体边界的质量通量净值。取任意微元控制体 V_1，其边界为闭合曲面 S，根据质量守恒定律，建立如下积分形式的质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{V_1}\rho dV_1+\iint_S \rho u\cdot n dS=0$$

式中：ρ——流体密度，kg/m³；

t——时间，s；

V_1——微元控制体体积，m³；

S——控制体边界曲面，m²；

u——流体速度矢量，m/s；

n——控制体边界外法向量。

对于船舶，假设遭遇的流体为不可压缩流，上式可以进一步写成：

$$\rho\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{V_1}dV_1+\rho\iiint_{V_1}\nabla\cdot u dV_1=0$$

式中：∇——散度算子。

2.2.2　湍流模型

2.2.2.1　船舶在波浪中运动时，船体周围流场为非定常、粘性、湍流流动，粘流求解器一般采用雷诺平均法（Reynolds Averaging）对瞬时 Navier-Stokes 方程进行平均，分离时均量与脉动分量，解决湍流流动的求解问题，即 1.2.4.1 中的表达式。

2.2.2.2　RANS 方程中存在雷诺应力张量τ_{ij}^{R}，导致方程不封闭，一般需通过湍流模型建立雷诺应力与时间平均速度之间的关系，实现方程封闭。在船舶波浪运动模拟中，一般采用 k-ω SST（Shear Stress Transport）湍流模型，该模型结合了 k-ω模型近壁区精度高和 k-ε模型远场稳定性好的优点，通过求解湍动能 k_1 和比耗散率ω_1 的输运方程，实现雷诺应力的封闭。

2.2.3　雷诺应力封闭假设

2.2.3.1　k-ω SST 模型采用 Boussinesq 假设，通过下式将雷诺应力张量与平均速度梯度关联起来：

$$\tau_{ij}^{R}=\mu_t\left(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k_1\delta_{ij}$$

式中：μ_t——湍流粘性系数，Pa·s；

k_1——湍动能，m²/s²；

δ_{ij}——克罗内克符号（$i=j$ 时δ=1，$i\neq j$ 时δ=0）；

$\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}$——湍动能引起的各向同性压力项。

2.2.3.2　湍流粘性系数μ_t由湍动能 k_1 和比耗散率ω_1 确定：

$$\mu_t=\rho\frac{k_1}{\omega_1}$$

湍动能 k_1 的物理意义是单位质量流体的湍流脉动动能，其输运方程由瞬时动量方程与雷诺平均动量方程相减，再与速度脉动分量点积，经过时间平均后推导得到，最终形式为：

$$\frac{\partial k_1}{\partial t}+\overline{u}_j\frac{\partial k_1}{\partial x_j}=\nabla\cdot\left(\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k_1\right)+P_k-\rho\omega_1 k_1$$

式中：σ_k——湍动能扩散系数；

∇——散度算子；

$\rho\omega_1 k_1$——湍动能耗散项，反映了湍流脉动能量转化为热能的耗散过程；

ω_1——比耗散率，1/s。

2.2.3.3　比耗散率ω_1是湍动能的耗散率与湍动能的比值，其输运方程由k_1的输运方程与ω_1的定义式推导得到，结合 k-ω SST 模型的混合函数，最终形式如下式：

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial \omega_1}{\partial x_j}=\nabla\cdot\left(\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\omega}\right)\nabla\omega_1\right)+\alpha\frac{\omega}{k_1}P_k-\beta\rho\omega_1{}^2+\gamma(\nabla k_1\cdot\nabla\omega_1)$$

式中：σ_ω——比耗散率扩散系数；

∇——散度算子；

$\alpha\frac{\omega_1}{k_1}P_k$——比耗散率生成项，α为生成系数右边第三项；

$-\beta\rho\omega_1^2$——比耗散率耗散项，β为耗散系数；

$\gamma(\nabla k_1\cdot\nabla\omega_1)$ ——交叉扩散项，用于提升模型在逆压梯度流动中的稳定性，γ为交叉扩散系数。

2.2.3.4　k-ω SST 模型的核心优势是通过混合函数F_1，实现 k-ω模型与 k-ε模型的自动切换，近壁区（$y^+\leq100$）采用 k-ω模型，保证边界层计算精度；远场（$y^+>100$）采用 k-ε模型，提升流场稳定性。混合函数F_1的推导基于壁面距离y，其表达式如下式：

$$F_1=\tanh\left(\left(\min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k_1}}{0.09\omega_1 y},\frac{500\nu}{y^2\omega}\right),\frac{4\rho k_1}{\mu_t C_{dk}y^2}\right)\right)^4\right)$$

式中：y——壁面距离，m；

C_{dk}——常数，$C_{dk}=0.075$。

当F_1=1 时，模型完全采用 k-ω模式；当F_1=0 时，模型完全采用 k-ε模式；中间区域则通过F_1线性插值，实现两种模式的平滑过渡。

第 3 节　VOF自由面

2.3.1　一般要求

2.3.1.1　船舶在波浪中运动及波浪载荷的粘流计算涉及空气－水两相流动，核心是精准捕捉气液界面（自由面），一般采用 VOF 法，通过定义体积分数以描述气液两相分布，进而推导自由面输运方程。

2.3.2　水相体积分数α

2.3.2.1　水相体积分数α表示为控制体内水相体积与控制体总体积的比值，按下式计算：

$$\alpha=\frac{V_w}{V_f}$$

式中：V_w——控制体内水相体积，m^3；

V_f——控制体总体积，m^3。

当α=1 时，控制体为纯水相；当α=0 时，控制体为纯空气相；当 0<α<1 时，控制体为气液两相混合区，即自由面区域。同时，空气相体积分数α_a=1-α，满足$\alpha+\alpha_a$=1。

2.3.3　水相质量的变化率

2.3.3.1　根据质量守恒定律，水相质量的变化率等于通过控制体边界的水相质量通量净值。水相质量守恒的积分形式如下式：

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{V_1}\rho\alpha dV_1+\iint_S\rho\alpha u\cdot ndS=0$$

式中：ρ——流体密度，kg/m^3；

α——水相体积分数；

dV_1——流体微元体积；

dS——微元表面积；

u——流体速度矢量，m/s；

n——表面外法线单位向量。

不考虑水的可压缩性，可以得到：

$$\rho\left(\iiint_{V_1}\frac{\partial\alpha}{\partial t}dV_1+\iiint_{V_1}\nabla\cdot(\alpha u)dV_1\right)=0$$

式中：ρ——流体密度，kg/m^3；

∇——散度算子；

α——水相体积分数

dV_1——流体微元体积；

u——流体速度矢量，m/s。

因$\rho\neq0$，且控制体为任意微元体，可得 VOF 自由面输运方程：

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha u)=0$$

式中：α——水相体积分数；

∇——散度算子；

u——流体速度矢量，m/s。

直角坐标系下，该方程可展开为：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\alpha u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\alpha u_z)}{\partial z}=0$$

式中：u_x、u_y、u_z——两相混合速度场分量，m/s。

2.3.4　其他

2.3.4.1　为避免自由面数值弥散、保证波面陡峭度，可以采用高分辨率界面捕捉（例如 HRIC）格式离散该方程，有效抑制界面扩散，精准捕捉波浪破碎、波峰波谷等复杂自由面形态。

第 4 节　六自由度刚体运动

2.4.1　一般要求

2.4.1.1　船舶在波浪中运动时，可视为刚性体，在水动力、重力、浮力等作用下做 6 自由度运动。粘流计算通过动态流体－固体相互作用，实现流场与船体运动的双向耦合，其核心是 6DOF 刚体动力学方程的求解。

2.4.1.2　以船体质心为坐标原点，建立随船运动的体坐标系（x'，y'，z'），其中 X'轴沿船体纵向（向首），Y'轴沿船体横向（向左），Z'轴沿船体垂向（向上）。根据刚体动力学理论，船体的平动运动与转动运动分别遵循牛顿第二定律和欧拉转动定律。

2.4.2　平动运动方程

2.4.2.1　船体平动运动的核心是：质心的加速度与作用在船体上的合外力成正比，即牛顿第二定律：

$$m\frac{d^2X_c}{dt^2}=\sum F$$

式中：m——船体质量，kg；

X_c——船体质心在惯性坐标系下的位置矢量，m；

$\sum F$——作用在船体上的合外力矢量，N。

2.4.2.2　作用在船体上的合外力主要包括：总水压力 F_{hydro}、重力 G 及其他外力 F_{ext}（如螺旋桨推力、系泊力等），即

$$\sum F=F_{\text{hydro}}+G+F_{\text{ext}}$$

式中：G——重力，$G=-mgk_z$，k_z 为惯性坐标系 z 轴单位矢量。

2.4.3　转动运动方程

2.4.3.1　船体转动运动遵循欧拉转动定律：刚体绕质心的角加速度与作用在刚体上的合外力矩成正比，按下式：

$$I\dot{\Omega}+\Omega\times(I\Omega)=\sum M$$

式中：I——船体绕质心的转动惯量张量，kg·m²；

Ω——船体角速度矢量，rad/s；

$\dot{\Omega}$——船体角加速度矢量，rad/s²；

$\sum M$——作用在船体上的合外力矩矢量，Nm；

$\Omega\times(I\Omega)$——科里奥利力矩，由刚体转动的离心效应产生。

2.4.3.2　在船体坐标系下，转动惯量张量I为对角矩阵（忽略惯性积），即：

$$I=\begin{pmatrix} I_{x'x'} & 0 & 0 \\ 0 & I_{y'y'} & 0 \\ 0 & 0 & I_{z'z'} \end{pmatrix}$$

式中：$I_{x'x'}$——绕 x'轴（横摇）的转动惯量，kg·m²；

$I_{y'y'}$——绕 y'轴（纵摇）的转动惯量，kg·m²；

$I_{z'z'}$——绕 z'轴（首摇）的转动惯量，kg·m²。

2.4.3.3　作用在船体上的合外力矩主要包括：水动力矩 M_{hydro}、重力与浮力产生的恢复力矩 M_{rest}，其他外力（如螺旋桨、系泊力等）引起的力矩 M_{ext}，关系式如下：

$$\sum M = M_{\text{hydro}} + M_{\text{rest}} + M_{\text{ext}}$$

式中：M_{hydro}——水动力矩，Nm，由船体湿表面的压力和粘性切应力积分得到；

M_{rest} ——恢复力矩，Nm，由重力与浮力的力臂差产生，是船体横摇、纵摇运动的主要恢复力矩；

M_{ext} ——其他外力力矩，Nm，（如螺旋桨、系泊力等）引起的力矩。

通过求解上述方程组，可得到船体在任意时刻的位移、速度、姿态角及角速度，如果需要得到剖面载荷也可以根据力和力矩的类似平衡关系获得。

第 5 节　数值造波与消波理论

2.5.1　一般要求

2.5.1.1　船舶在波浪中运动及波浪载荷的粘流计算应生成符合实际工况的入射波，并有效吸收出域波浪，避免反射波干扰流场。造波主要基于线性波浪理论（Airy 波）与非线

性波浪理论（Stokes 波）的规则波及不规则波，通过阻尼消波或者波力方法，抑制波浪的反射和保持波形稳定。

2.5.2　线性波浪（Airy 波）

2.5.2.1　线性波浪（Airy 波）适用于小波陡（波高 H 与波长λ之比 $H/\lambda\leq0.05$）的规则波，通过速度势描述波浪运动，满足如下式的色散关系：

$$\omega^2 = gk\tanh(kh)$$

式中：ω——波浪圆频率，rad/s；

h——水深，m；

k——波数，rad/m；

g——重力加速度，9.81m/s²；

tanh(kh)——双曲正切函数，深水（$h\geq\lambda/2$）时，tanh(kh)≈1，色散关系简化为$\omega^2=gk$；浅水（$h\leq\lambda/20$）时，tanh(kh)≈kh，色散关系简化为$\omega^2=gk^2h$。

2.5.2.2　自由面波高$\eta(x,t)$表达式如下：

$$\eta(x,t)=\frac{H}{2}\cos(kx-\omega t)$$

式中：H——波高，m；

k——波数，rad/m；

ω——波浪圆频率，rad/s；

t——时间，s。

2.5.3　非线性波浪（五阶 Stokes 波）

2.5.3.1　当波陡较大（$H/\lambda>0.05$）时，线性波浪理论（Airy 波）误差显著，需采用非线性波浪理论，其中五阶 Stokes 波理论因精度高、适配中高波陡（$H/\lambda\leq0.12$）考虑了波浪非线性相互作用，修正速度势、波高及速度场，五阶 Stokes 波的自由面波高$\eta(x,t)$表达式如下：

$$\eta(x,t)=\frac{H}{2}\cos\theta+\frac{3}{8}\varepsilon H\cos2\theta+\frac{15}{64}\varepsilon^2H\left(1+\frac{3}{2}\cosh^2(kh)\right)\cos3\theta+$$

$$\frac{35}{256}\varepsilon^3H\left(2+5\cosh^2(kh)\right)\cos4\theta+\cdots$$

式中：θ——波相位，rad，$\theta=kx-\omega t$；

cosh(kh)——双曲余弦函数，其余参数同线性波浪理论。该表达式通过高阶非线性修正，可精准描述波峰变尖、波谷变平的非线性特征，与实际海浪形态更贴合。

2.5.3.2 五阶 Stokes 波的速度势 $\phi(x,z,t)$展开式保留至ε^5项，如下：

$$\phi(x,z,t)=\frac{gH}{2\omega}\frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)}\cos\theta+\frac{3gH\,\delta}{8\omega}\frac{\cosh[2k(z+h)]}{\cosh^2(kh)}\cos 2\theta+$$
$$\frac{15gH\delta^2}{64\omega}\frac{\cosh[3k(z+h)]}{\cosh^3(kh)}\left(1+\frac{3}{2}\cosh^2(kh)\right)\cos 3\theta+\cdots$$

式中：ϕ——速度势，m^2/s；

g——重力加速度，$9.81m/s^2$；

H——波高，m；

k——波数，1/m；

ω——波浪圆频率，rad/s；

θ——相位，rad，$\theta=kx-\omega t$；

δ——波陡，$\delta=kH/2$。

2.5.4 不规则波

2.5.4.1 实际海况多为不规则波，其特征是由一系列不同频率、不同波高、不同相位的规则波叠加而成。不规则波造波一般基于线性叠加原理，结合 Pierson-Moskowitz（P-M）谱或 JONSWAP 谱，生成符合实际海况的不规则波。

2.5.4.2 不规则波的线性叠加。不规则波的波高$\eta(x,t)$、速度势$\varphi(x,z,t)$及速度分量$u(x,z,t)$、$w(x,z,t)$，均由 N 个不同频率的规则波叠加得到，通常采用线性 Airy 波，非线性场景可采用 Stokes 波，表达式如下：

$$\eta(x,t)=\sum_{n=1}^{N}\eta_n\cos(k_nx-\omega_nt+\varepsilon_n)\,,$$ ，对于波高叠加

$$\phi(x,z,t)=\sum_{n=1}^{N}\phi_n(x,z,t)=\sum_{n=1}^{N}\frac{g\eta_n}{\omega_n}\frac{\cosh[k_n(z+h)]}{\cosh(k_nh)}\cos(k_nx-\omega_nt+\varepsilon_n)$$ ，对于速度势叠加

式中：N——叠加的规则波个数，N 通常取 50~200，个数越多，不规则波越接近实际海况；

η_n——第 n 个规则波的波高；

k_n——第 n 个规则波的波数；

ω_n——第 n 个规则波的角频率；

ε_n——第 n 个规则波的随机相位（0~2π均匀分布），用于模拟不规则波的随机性。

2.5.4.3 海浪谱。不规则波的能量分布由海浪谱决定，一般采用 P-M 谱或 JONSWAP 谱。

（1）P-M 谱的表达式如下：

$$S(\omega)=\frac{5}{16}H_s^2\omega_p^4\omega^{-5}\exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right)$$

式中：$S(\omega)$——海浪谱密度，m²·s；

H_s——有义波高，m；

ω_p——谱峰频率，rad/s；

T_p——谱峰周期，s；

ω——波浪圆频率，rad/s。

（2）JONSWAP 谱的表达式如下：

$$S(\omega)=(1-0.287\ln\gamma)\frac{5}{16}H_s^2\omega_p^4\omega^{-5}\exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right)\gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right)}$$

式中：ω_p——谱峰频率，rad/s；

γ——谱峰增强因子，γ=1.0~7.0；

σ——谱宽参数，当$\omega\leq\omega_p$时，σ=0.07，$\omega>\omega_p$时，σ=0.09。

第 3 章　船舶非线性波浪载荷直接计算

第 1 节　一般规定

3.1.1　一般要求

3.1.1.1　本章给出了基于 CFD 方法的船舶非线性波浪载荷计算的具体要求。

3.1.1.2　基于粘流的船舶波浪载荷计算，一般应采用 CCS 推荐的计算软件，如采用其他软件或求解器，则需要得到 CCS 同意。

3.1.1.3　基于粘流的船舶波浪载荷计算，一般应得到运动响应时历曲线和水压力时历曲线，并结合质量分布得到分段剖面的波浪载荷。

3.1.1.4　基于粘流的船舶波浪载荷计算具体的流程图如图 3.1.1.4。流程主要包括：

（1）前处理：建立几何模型并进行设置；

（2）计算中的基本设定：对计算域、计算边界条件、环境输入、装载工况以及船舶重心转动惯量的属性、监测的输入和输出进行设定；

（3）计算结束的处理：开展水动压力的提取、分段的受载情况、运动以及载荷的程序处理，得到波浪载荷时历曲线。

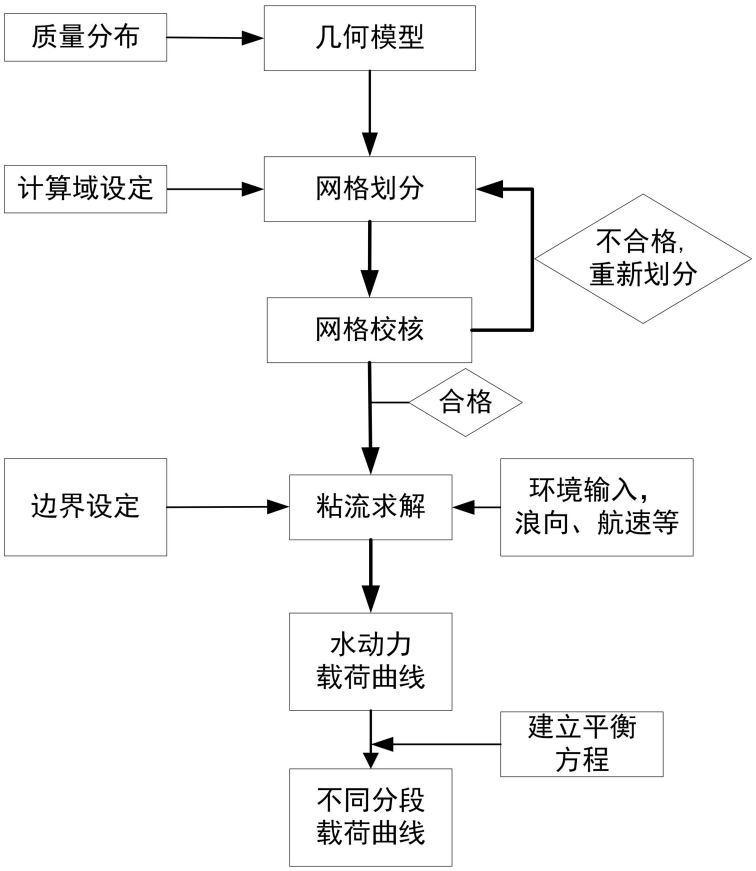


图 3.1.1.4　计算流程图

第 2 节　计算几何模型及设置

3.2.1　计算几何模型

3.2.1.1　粘流数值计算模型首先应建立几何模型。一般情况下几何模型应严格按照船舶型线图、型值表及总布置图等进行三维建模，精确反映船舶线型特征、附体布置（如减摇鳍、龙骨）。模型表面应保证光滑连接，形成全封闭实体，避免几何缺陷导致的计算误差。几何模型应为三维通用数据格式，如 STEP、IGES、STL 等。

3.2.1.2　如果需要考虑甲板上浪，舷侧砰击或者波动压力等，应建立对应的上层建筑、船舷以上的几何模型。

3.2.1.3　对于模型尺度计算，缩尺比应根据计算目的确定，一般可参照水池试验的船模尺度。对于实船尺度计算，应建立实尺度模型，并根据雷诺数等条件设置合适的壁面处理方式。

3.2.2　计算域设置

3.2.2.1　船舶静水域计算主要是确定船舶初始状态下的静水载荷和模型状态。静水域设定如下表所示（采用对称边界）。

计算域设定（静水）　　表 3.2.2.1

边界	推荐尺寸	最小尺寸
入口（船首前方）	1.5~2.0 L	1.0 L
出口（船尾后方）	3.0~5.0 L	2.0 L
侧边界	1.5~2.0 L	1.0 L
底部边界	1.5~2.0 L	1.0 L
顶部边界	0.5~1.0 L	0.3 L

3.2.2.2　当考虑波浪传播时，可以根据 ITTC(International Towing Tank Conference)推荐的指南《Practical guidelines for ship CFD applications》来划分，综合考虑计算时间和计算资源等要素，推荐的带重叠网格的计算域划分，见图 3.2.2.2 和表 3.2.2.2。背景网格的出口边界应添加阻尼消波区，消波区长度至少为 1.5 倍波长，可选择力阻尼或粘性阻尼消波方式，避免波浪在边界反射影响流场模拟。对于波浪衰减较明显，可以添加波加强区域来迫使波浪满足需求，该区域推荐为 1~1.5 倍波长。

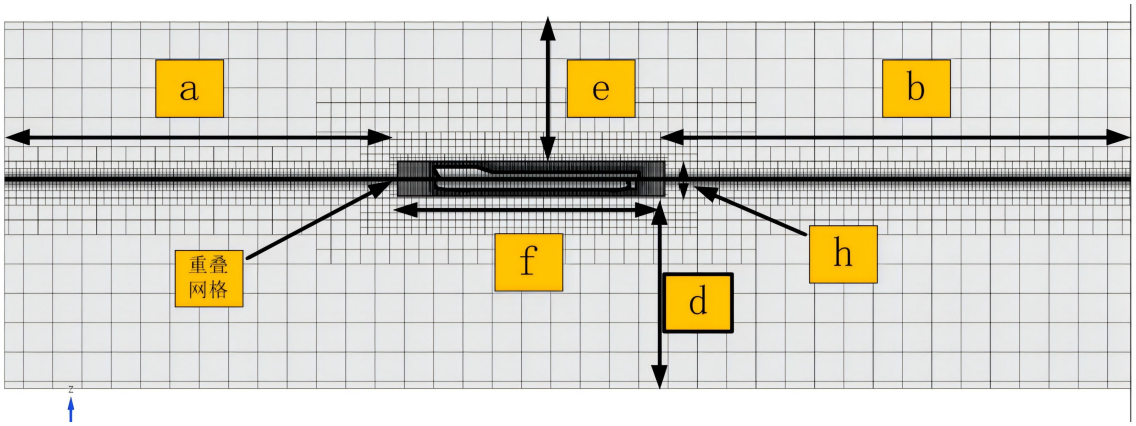


图 3.2.2.2（1）　计算域纵向示意

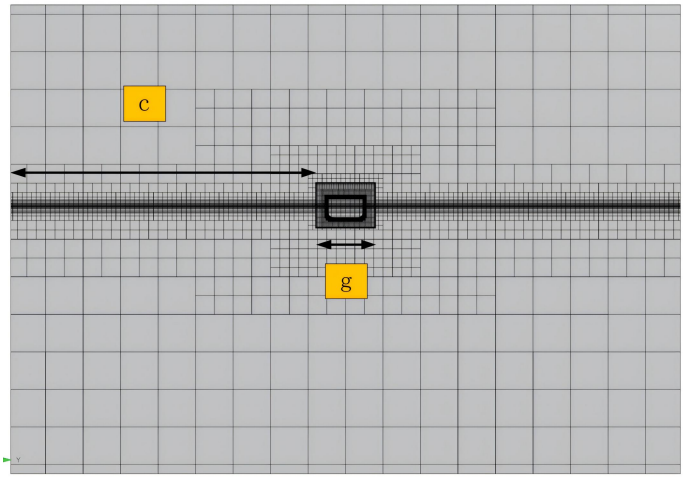


图 3.2.2.2（2）　计算域横向示意

计算域设定（波浪）　　表 3.2.2.2

边界	推荐尺寸	最小尺寸
入口（重叠前方）a	1.1~2.0 *L*	1.0 *L*
出口（船尾后方）b	3.0~5.0 *L*	2.0 *L*
侧边界 c	1.5~2.0 *L*	1.0 *L*
底部边界 d	1.5~2.0 *L*	1.0 L
顶部边界 e	0.5~1.0 *L*	0.5*L*
重叠区域(*x* 方向)f	1.25~1.5*L*	1.25*L*
重叠区域(*y* 方向)g	1.5~3*B*	1.5*B*
重叠区域(*z* 方向)h	2~6*D*	2*D*

第 3 节　网格划分及验证

3.3.1　网格划分一般原则

3.3.1.1　网格为离散化的空间求解单元，网格类型包括结构化网格（多块结构化网格）、非结构化网格、混合网格，网格单元类型包括四面体、六面体、楔形及金字塔形等。推荐使用切割体网格单元生成器，构建目标尺寸的六面体网格单元，以获得更好的计算精度和收敛性。

3.3.1.2　网格划分应能正确求解流场的所有重要特征，包括壁面边界层、自由面波形、船首碎波、船尾伴流等，一般推荐船体表面网格尺寸Δs 取$(0.002\sim\ 0.005)L$；

3.3.1.3　对于几何特征变化较大的区域（如球鼻首、舭部、舵叶等）以及流场关键特征区域（自由面、边界层、尾流区等），应进行网格细化，以准确描述几何外形并捕捉关键流动特征；边界层网格，边界层层数 5~15 层，增长率 1.1~1.5，可以根据选择湍流模型适当调整。

3.3.1.4　自由面区域网格应满足表 3.3.1.4 的要求：

自由面网格划分　　表 3.3.1.4

参数	推荐值	最大值
x 方向网格划分尺寸	波长的 1/80~1/150	波长的 1/40
y 方向网格划分尺寸	波长的 1/80~150	波长的 1/40
z 方向网格划分尺寸	波高的 1/12~1/40	波高的 1/8

3.3.2　网格质量要求

3.3.2.1　检查网格质量以保证所有网格没有负体积或较大扭曲网格，正交性以及体积变化率都在合理区间。 按 CFD 计算常用网格评估指标，见表 3.3.2.1。

网格评估指标　　表 3.3.2.1

质量指标	理想范围	可接受范围	不理想范围
长宽比	<10	<100	>1000
扭曲度	<0.25	<0.7	>0.85
正交性	>0.9	>0.2	<0.1
体积变化率	<2	<5	>10

3.3.3　网格收敛性验证

3.3.3.1　数值计算中应进行至少三套网格的收敛性验证，分别为粗网格，用于初步分

析。中网格用于基准计算，可以根据粗网格的基准网格$1/\sqrt{2}$倍来重新划分网格。细网格主要用于收敛性判断，可以根据中网格的基准网格$1/\sqrt{2}$倍来重新划分网格。主要通过关键物理量（力矩等）变化率 ＜2% 以及网格收敛指数（Grid Convergence Index, *GCI*） ＜5% 来判断网格收敛性，*GCI* 按下式得到：

$$GCI=\frac{F_s|\varepsilon|}{r^p-1}$$

式中：ε——系数，$\varepsilon=(f_2-f_1)/f_1$；

f_2——中网格计算物理量；

f_1——细网格计算物理量；

f_3——粗网格计算物理量；

F_s——安全因子，通常取 1.25；

r——网格加密比，取为$\sqrt{2}$。p 为收敛阶，按下式得到：

$$p=\frac{In\left|\frac{f_3-f_2}{f_2-f_1}\right|}{Inr}$$

3.3.3.2　至少提供一种工况下的网格收敛性分析，以评估计算结果对于网格的依赖性，形成最佳网格划分。

第 4 节　计算工况设定

3.4.1　一般要求

3.4.1.1　船舶波浪载荷计算基本的计算工况设定包括典型装载工况下的规则波计算工况和不规则波计算工况。

3.4.2　装载工况

3.4.2.1　一般应根据装载手册至少选取使静水中拱弯矩或静水中垂弯矩达到最大的航行工况作为计算工况。

3.4.2.2　应提供船体三维几何模型和静水力计算书对比数据，对比要素应至少包含水线长、船宽、型深、计算工况下的湿表面积、型排水体积、浮心纵向位置和浮心垂向位置、静水弯矩等信息。其中型排水体积的相对误差应不大于 0.3%，浮心纵向位置的绝对误差不大于 0.1%L，并且需要校核质量分布位置与船体转动惯量是否相匹配，使最大静水弯矩的相对误差不大于 5%。

3.4.3　规则波计算工况

3.4.3.1　规则波根据实际工程需求设定浪向角、航速、波高条件以及计算的时间步长、总时间。

3.4.3.2　规则波可采用一阶 Airy 波或 Stokes 五阶波理论生成。对于小幅波浪，可以参考本指南 2.5.2 线性波浪（Airy 波）的规定。若要考虑非线性效应，推荐采用五阶 Stokes 波，具体可以参考本指南 2.5.3 非线性波浪（五阶 Stokes 波）的规定。

3.4.3.2　最小模拟时长一般为 20 个波浪周期。应根据输出的时历曲线，扣除不稳定的时间段。

3.4.4　不规则波计算工况

3.4.4.1　不规则波根据实际工程需要设定浪向角、航速、有义波高、谱峰周期、频率子样数以及计算的时间步长和总时间。

3.4.4.2　不规则波的生成见本指南 2.5.4.1 和 2.5.4.2。

3.4.4.3　海况选择，采用 IACS Rec.34 北大西洋波浪散布图或特定航区波浪散布图，或者根据实际营运海域以及不同区域的海浪谱进行选择。常用海浪谱见本指南 2.5.4.3。

3.4.4.4　对于实船尺度计算，最小模拟时长一般为 30～60 分钟，统计收敛时长应至少包含 200 个波浪周期。对于模型尺度计算，最小模拟时长应根据相似准则进行换算。应根据输出的时历曲线，扣除不稳定的时间段。

第 5 节　求解设定

3.5.1　一般要求

3.5.1.1　船舶波浪载荷计算时，应对边界条件、时间步长、湍流模型等进行设置，并进行求解的收敛性判断。

3.5.2　边界条件设置

3.5.2.1　对于边界条件的设置主要根据求解器的类型及计算要求设置。

3.5.2.2　对于流速入口一般推荐为速度入口，指定压力出口处为压力出口边界，船舶表面无滑移壁面，计算域的两侧、底部及上方为速度入口。如果需要对称计算，模拟中几何的对称面设置为对称边界。水深根据本章 3.2.2 计算域设定。

3.5.2.3　若设置了重叠区域，则重叠网格的外边界设置为重叠网格边界。

3.5.2.4　对于计算域的出口边界需要进行阻尼消波，抑制波浪反射，消波区域一般推荐 1.5~2 倍波长。若波区域有波浪力增强功能可以在四周边界增加波浪力。对于船体附近

区域进行波浪高度监测，将波浪输入与设置进行一定修正。

3.5.2.5　运动约束。船舶在波浪中运动释放了自由度，可以根据力和矩平衡求得任意剖面的载荷情况，但释放自由度过多往往会导致计算不稳定和计算资源的增加。不同约束可以得到不同载荷，如释放纵摇和升沉，可以得到垂向弯矩和垂向剪力。若要释放六个自由度，需要在尾部增加舵力以保持平衡。

3.5.3　时间步长设置

3.5.3.1　在基于粘流的船舶非线性载荷计算中，库朗数 *CFL* （Courant Friedrichs Lewy）时间步长选择应满足下式条件：

$$CFL = \frac{|u_C|\Delta t}{\Delta x} < 1$$

式中：u_C——相对移动速度，m/s；

Δt——每个时间步长，s；

Δx——x 方向的网格尺寸，m。

3.5.3.2　在保证库朗数小于 1 的前提下，进一步根据实际需要调整时间步长。

3.5.3.3　如果需要监测砰击、甲板上浪等载荷则需要进一步调小时间步长。

3.5.4　湍流模型

3.5.4.1　基于粘流的波浪载荷计算的湍流模型一般应采用 SST k-ω模型，也可采用 RNG（Renormalization Group）k-ε模型、Realizable k-ε模型以及部分 LES（Large Eddy Simulation）模型。

3.5.5　求解收敛准则

3.5.5.1　基于粘流的船舶波浪载荷求解计算中，收敛性可以根据计算过程中的残差变化来判断，常见的残差包括湍动能、耗散率、速度等。船舶在波浪中运动的情形中残差时常难以降至很低，还需要结合其他物理量（运动、力矩等）来判断。

3.5.5.2　规则波下船体表面波动压力监测点、自由面波高监测点、砰击上浪监测点应趋于周期性稳态。

3.5.5.3　规则波下力/力矩监测：船体受到的合力和合力矩随时间周期性稳定变化，无明显漂移。

3.5.5.4　规则波下周期性收敛：对于规则波模拟，至少计算 5～10 个波浪周期，确保运动响应达到周期性稳态。

3.5.5.5　对于不规则波则需要根据时历曲线具体判断，并符合 3.4.4.3 中的要求。

3.5.6　监测点设置

3.5.6.1　一般应对所需监测进行监测点设置。在船中水线附近应进行波动压力监测，在船前方船长 *L*/2 以及船四周应进行系列浪高仪监测，在船首两侧和首底区域、尾板等应进行砰击监测，在甲板面、上层建筑壁面应进行甲板上浪监测。

3.5.6.2　监测点位置也可以根据实际需要进行补充或调整。

第 6 节　波浪载荷输出

3.6.1　一般要求

3.6.1.1　在完成船舶波浪载荷计算后，一般应输出船体外壳的水动压力、船舶的运动及加速度时历曲线、船体梁载荷时历曲线。

3.6.2　水动压力

3.6.2.1　一般应沿船体表面在关注区域布置压力监测点，对监测点的时历曲线进行统计，并结合压力云图等计算结果综合分析，主要包括：

（1）波动压力：船体表面水动压力引起的压力，一般较为缓和；

（2）砰击压力：船波发生剧烈相对运动产生的压力，常见于船首部及舷侧、首底等；

（3）上浪压力：水体涌上甲板面、上层建筑等形成的冲击压力。

3.6.3　水动压力引起的力和力矩

3.6.3.1　通过水动压力沿着船长表面按如下公式进行积分可以得到力和力矩。

$$F_x(x)=\iint_{A(x)}p(x,y,z)n_x dA$$
$$F_y(x)=\iint_{A(x)}p(x,y,z)n_y dA$$
$$F_z(x)=\iint_{A(y)}p(x,y,z)n_z dA$$

$$M_x(x)=\iint_{A(x)}p(x,y,z)(z-z_{ref})n_y dA$$
$$M_y(x)=\iint_{A(x)}p(x,y,z)(x-x_{ref})n_z dA$$
$$M_z(x)=\iint_{A(x)}p(x,y,z)(x-x_{ref})n_y dA$$

式中：$A(x)$——x 处横剖面湿表面，m^2；

n_x、n_y、n_z——垂向法向量分量；

$x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$——力矩参考点，m；

$p(x,y,z)$——水动压力，Pa；

$F_i, i = x, y, z$ ——分别为 3 个方向的力，N；

$M_i, i = x, y, z$ ——分别为 3 个方向的矩，Nm。

3.6.4 运动及加速度

3.6.4.1 根据计算工况 3.5.2.5 的运动约束，若释放了一自由度可以输出相应的运动时历曲线。常见船舶重心处的运动时历曲线包括：

（1）平移和转动，平移包括：纵荡（Surge）、横荡（Sway）、垂荡（Heave），转动包括：横摇（Roll）、纵摇（Pitch）、首摇（Yaw）；

（2）速度和角速度，速度包括：*x* 方向速度、*y* 方向速度、*z* 方向速度，角速度包括：*x* 方向角速度、*y* 方向角速度、*z* 方向角速度；

（3）加速度和角加速度，加速度包括：*x* 方向加速度、*y* 方向加速度、*z* 方向加速度，角速度包括：*x* 方向角加速度、*y* 方向角加速度、*z* 方向角加速度。

3.6.5 船体梁波浪载荷

3.6.5.1 根据船舶的质量分布，水动压力引起的力和力矩以及运动时历曲线，可以根据下面的平衡方程求得船舶任意横剖面的波浪载荷的时历曲线。

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} F_{extx} \\ F_{exty} \\ F_{extz} \\ M^A_{extx} \\ M^A_{exty} \\ M^A_{extz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m\left[\dot{u} + qw - rv - (x_G - x_A)(q^2 + r^2)\right] \\ m\left[\dot{v} + ru - pw + (x_G - x_A)(qp + \dot{r})\right] \\ m\left[\dot{w} + pv - qu + (x_G - x_A)(rp - \dot{q})\right] \\ I_x\dot{p} - I_{xy}(\dot{q} - rp) - I_{zx}(\dot{r} + pq) + (I_z - I_y)qr + I_{yz}(r^2 - q^2) \\ I_y\dot{q} - I_{yz}(\dot{r} - pq) - I_{xy}(\dot{p} + qr) + (I_x - I_z)rp + I_{zx}(p^2 - r^2) - m[(x_G - x_A)(\dot{w} + pv - qu)] \\ I_z\dot{r} - I_{zx}(\dot{p} - qr) - I_{yz}(\dot{q} + rp) + (I_y - I_x)pq + I_{xy}(q^2 - p^2) - m[(x_G - x_A)(\dot{v} + ru - pw)] \end{pmatrix}$$

式中：$(\dot{u},\dot{v},\dot{w})$——*x*，*y*，*z* 方向的加速度，m/s²；

$(\dot{p},\dot{q},\dot{r})$ ——绕 X，Y，Z 轴的角加速度，rad/s²；

F_{ext}——水动压力引起的外力，N；

M_{ext}——水动压力引起的外力矩，Nm。

船舶任意横剖面的垂向弯矩、垂向剪力、水平弯矩、水平剪力和扭矩的符号见图 3.6.5.1，说明如下：

（1）垂向弯矩 M_y 在强力甲板产生拉应力（中拱弯矩）时为正，在底部产生拉应力（中垂弯矩）时为负。

（2）垂向剪力 Q_z 在所考虑的横剖面之后作用的合力向下或在所考虑的横剖面之前作用的合力向上时为正。

（3）水平弯矩 M_z 在右舷产生拉伸应力时为正，在左舷产生拉伸应力时为负。

（4）扭矩 M_x 在所考虑的横剖面之后合力矩绕 X 轴的负方向旋转或在横剖面之前合力矩沿 X 轴的正方向旋转时为正。

（5）水平剪力 Q_y 在所考虑的横剖面之后作用的合力向右舷或在所考虑的横剖面之前作用的合力向左舷时为正。

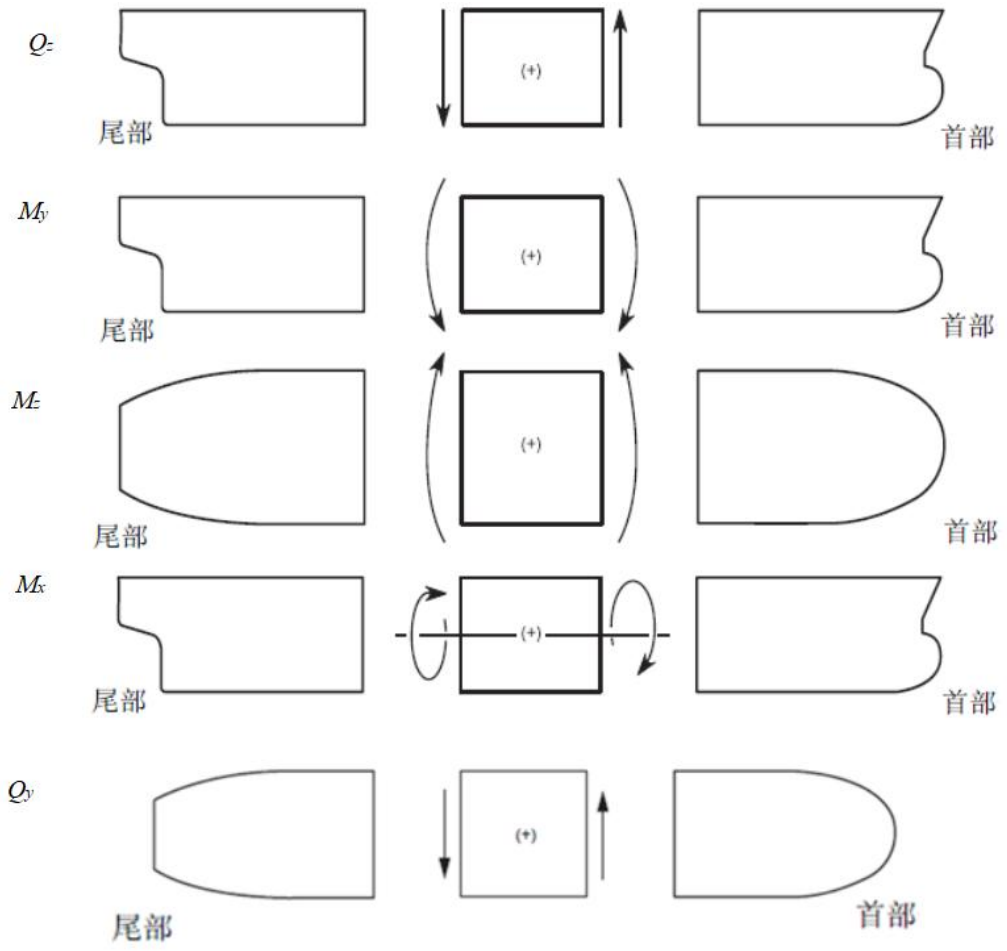


图 3.6.5.1　船舶任意横剖面船体梁符号及示意