



中国船级社

附录 4 渔业养殖设施载荷计算 推荐做法

中国船级社

2024 年 11 月

目 录

第1节 一般规定.....	1
4.1.1 一般要求.....	1
4.1.2 基本技术路线.....	2
第2节 桁架类养殖设施载荷计算.....	4
4.2.1 一般要求.....	4
4.2.2 载荷.....	4
4.2.3 静力分析方法.....	5
4.2.4 时域规则波分析方法.....	5
4.2.5 时域随机波分析方法.....	9
4.2.6 网衣载荷.....	9
4.2.7 管节点构造要求.....	12
4.2.8 有限元分析.....	12
第3节 半潜类（柱稳式）养殖设施载荷计算.....	13
4.3.1 一般要求.....	13
4.3.2 载荷.....	13
第4节 浮体桁架混合类养殖设施载荷计算.....	14
4.4.1 一般要求.....	14
4.4.2 载荷.....	14
4.4.3 超细圆管桁架结构的特殊考虑.....	15

附录 4 渔业养殖设施载荷计算推荐做法

第 1 节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 根据养殖设施的结构形式和受力特点，将养殖设施分为桁架类、半潜类、浮体桁架混合类，分别给出强度校核载荷计算的推荐做法。

4.1.1.2 桁架类养殖设施



图 4.1.1.2 桁架类养殖设施

桁架类养殖设施（见图 4.1.1.2），是指主体结构为桁架结构，主要承受小尺度构件的莫里森（Morison）力和渔网水动力载荷等非线性载荷，通常难以获得结构的控制载荷响应，不宜采用等效设计波法。

4.1.1.3 半潜类养殖设施



图 4.1.1.3 半潜类养殖设施

半潜类养殖设施（见图 4.1.1.3），是指以传统半潜式平台为主体，并在主体结构上增设网衣及支撑结构的养殖设施。小尺度构件和网衣对其运动和载荷有一定的影响，但结构型式与传统油气半潜式平台相似，载荷计算方法仍以半潜式平台等效设计波方法为主，并补充考虑小尺度杆件波浪力、网衣水动力等非线性载荷的影响。

4.1.1.4 浮体桁架混合类养殖设施



图 4.1.1.4 浮体桁架混合类养殖设施

浮体桁架混合类养殖设施(见图 4.1.1.4),是指由桁架连接多个分布式浮体的养殖设施。由于桁架和网衣水动力载荷占有重要地位,不宜直接采用半潜平台等效设计波法,应结合等效设计波法和小尺度杆件的载荷计算方法,统筹考虑板壳结构、桁架结构和网衣的载荷。

4.1.1.5 养殖设施载荷计算的总体原则:

(1) 对于小尺度构件和网衣建议使用莫里森(Morison)公式计算载荷。对于较大的板壳结构建议使用势流理论计算载荷。推荐使用时域分析方法同时考虑两种结构的载荷。

(2) 对于半潜类和浮体桁架混合类养殖设施,如采用频域分析方法计算载荷,需要对载荷进行修正或保守考虑。

(3) 其他类型的养殖设施的载荷计算可参照本附录适用条款执行。

4.1.2 基本技术路线

针对三类设施的基本技术路线可以参考下图:

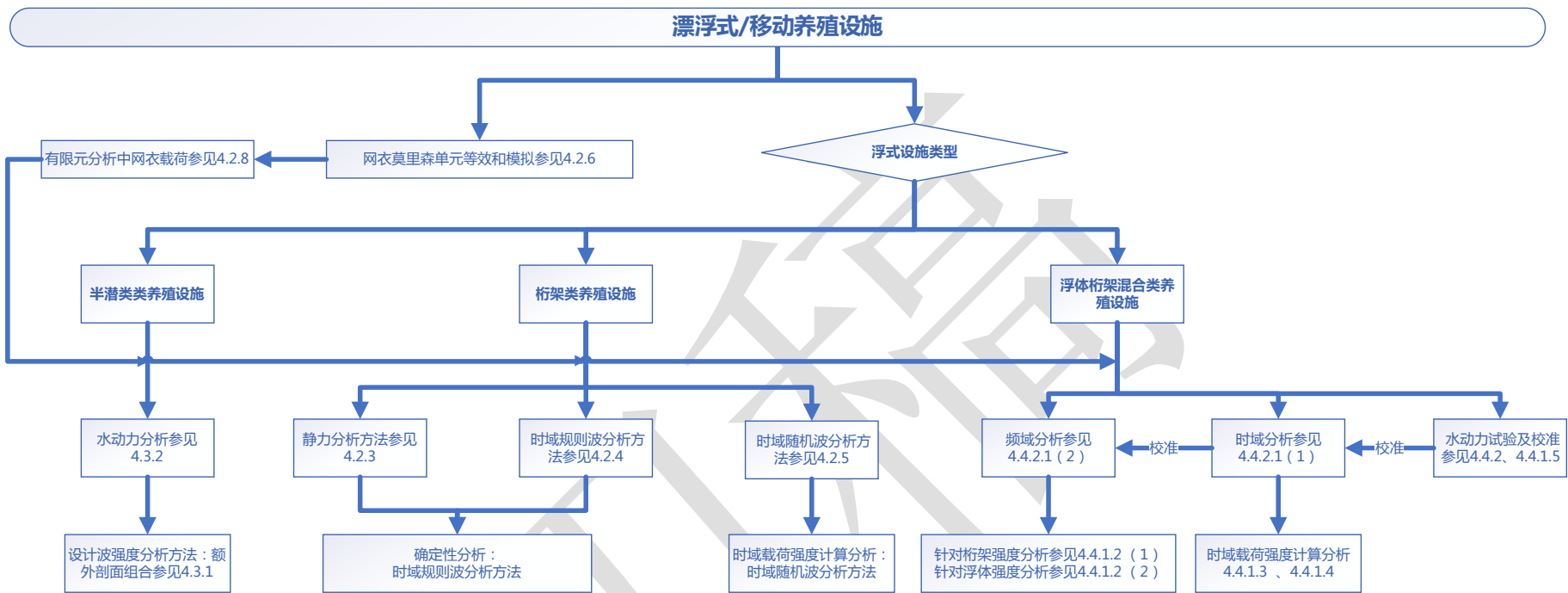


图 4.1.2 漂浮式（移动或浮动）养殖设施基本技术路线图

第2节 桁架类养殖设施载荷计算

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 对于桁架类渔业养殖设施，由于结构主要是由小尺度构件和网衣组成，建议使用莫里森公式计算载荷。

4.2.1.2 对于漂浮式（移动或浮动）设施，推荐采用时域分析方法，考虑系泊系统的影响，计算设施在风、波、流联合作用下的载荷和运动。

4.2.1.3 对于固定式设施，采用静力分析法计算平台在风、波、流联合作用下的载荷。

4.2.1.4 桁架类养殖设施具有较复杂的水动力特性，建议采用水池试验对水动力分析进行校准，在缺少水池试验时，运动、载荷及相关水动力参数应保守估计。

4.2.2 载荷

4.2.2.1 可采用确定性方法（时域规则波分析方法），计算设施在最大波高、不同浪向、周期和相位下的响应。确定性方法的要求如下：

(1) 确定性方法的最大波高 H_{max} 可按照《海上移动平台入级规范》(2023)第2篇2.3.2.1的规定确定。

(2) 波浪相位间隔建议不超过 5° 。

(3) 波浪周期可按照《海上移动平台入级规范》(2023)第2篇2.3.3的规定计算。在分析时，应包括最大和最小波浪周期在内的若干个周期。

(4) 在上述周期范围之外，波高小于 H_{max} 的波浪，如果对结构构件有更不利的影响，亦应予以考虑。

(5) 波浪理论可按照《海上移动平台入级规范》(2023)第2篇2.3.4选择。采用线性波模拟波浪时，应采用一定的数学方法将水质点运动从静水面变换至瞬时自由液面。

4.2.2.2 如采用时域随机波分析方法，设计环境条件应根据可靠及足够的实测资料由统计分析确定，对于可能引起更大结构响应的波高-周期组合应予以考虑，波高-周期组合可根据波陡限制条件或作业区域的环境条件确定。

4.2.2.3 波浪方向间隔应不超过30度。

4.2.2.4 一般小尺度孤立桩柱的波浪载荷可用莫里森公式计算。莫里森公式的一般形式为：

$$F = F_D + F_I = \frac{1}{2} C_D \rho D |u - \dot{x}|(u - \dot{x}) + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} - C_A \rho \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x}_n$$

式中： F_D ——拖曳力，kN/m；

F_I ——惯性力，kN/m；

C_D ——拖曳力系数；

C_M ——惯性力系数；

C_A ——附加质量系数， $C_A = C_M - 1$ ；

ρ ——海水密度， 1.025t/m^3 ；

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 ；

D ——圆柱直径，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 。

4.2.2.5 莫里森公式的水动力系数保守可取 $C_D=1.2$ 、 $C_M=1.8$ ，或者按照表 4.2.2.5 考虑光滑和粗糙两种状态。

水动力系数 表 4.2.2.5

系数	光滑	粗糙
C_D	0.65	1.2
C_M	1.8	1.3

4.2.2.6 设计时应考虑海生物附着导致载荷增加情况，海生物附着的厚度和范围应根据当地环境调查的数据来确定。应通过增大所有结构杆件截面面积方式考虑海生物厚度。

4.2.2.7 飞溅区内的水平杆件可能遭受波浪砰击，砰击力是由于波浪穿过时，局部水面上升和下降拍击杆件下部所造成的近乎垂直的力。单位长度上的冲击力可按照下式估算：

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_s D v^2$$

式中： F_s ——砰击力， kN/m ；

ρ ——海水密度，取 1.025t/m^3 ；

C_s ——砰击系数，对于光滑的圆柱取 5.15；

D ——圆柱直径， m ；

v ——冲击时水面和构件表面的相对速度， m/s 。

4.2.3 静力分析方法

4.2.3.1 对于固定式设施，可参考《SY/T 10030 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》进行分析。

4.2.4 时域规则波分析方法

4.2.4.1 时域规则波分析方法应考虑波流联合作用以及系泊系统的影响，计算得到设施在预定海况下的稳定响应。设施承受的动载荷如图 4.2.4.1 所示。

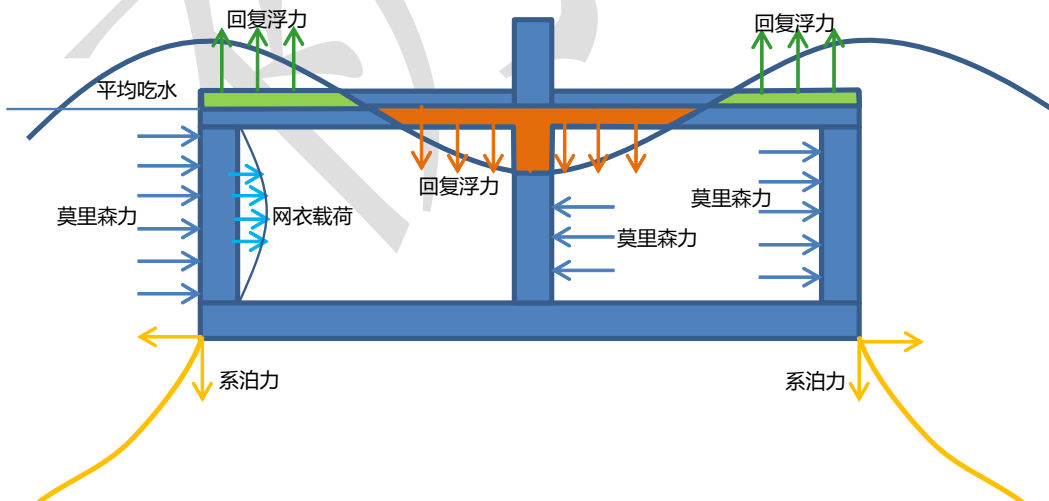


图 4.2.4.1 漂浮式设施承受的动载荷示意图

4.2.4.2 时域分析可假设初始速度、加速度为零，按照如下步骤迭代计算设施的运动和载荷：

- (1) 根据设施的运动状态（加速度、速度、位移），计算任意位置处的速度、加速度；
- (2) 根据计算点的速度、加速度和水质点速度、加速度，计算得到计算点的波浪力；
- (3) 根据系泊点的位移和系泊刚度计算系泊力；
- (4) 根据杆件载荷积分求和获得设施的合力和弯矩；
- (5) 根据合力、弯矩和设施的质量和转动惯量，计算设施的加速度、角加速度；
- (6) 根据设施的加速度、角加速度和时间间隔计算下个时刻的运动状态；
- (7) 重复 1-6 步骤，直至设施的运动和载荷达到周期性循环状态。

典型的规则波时域分析的载荷及位移时历曲线见图 4.2.4.2。

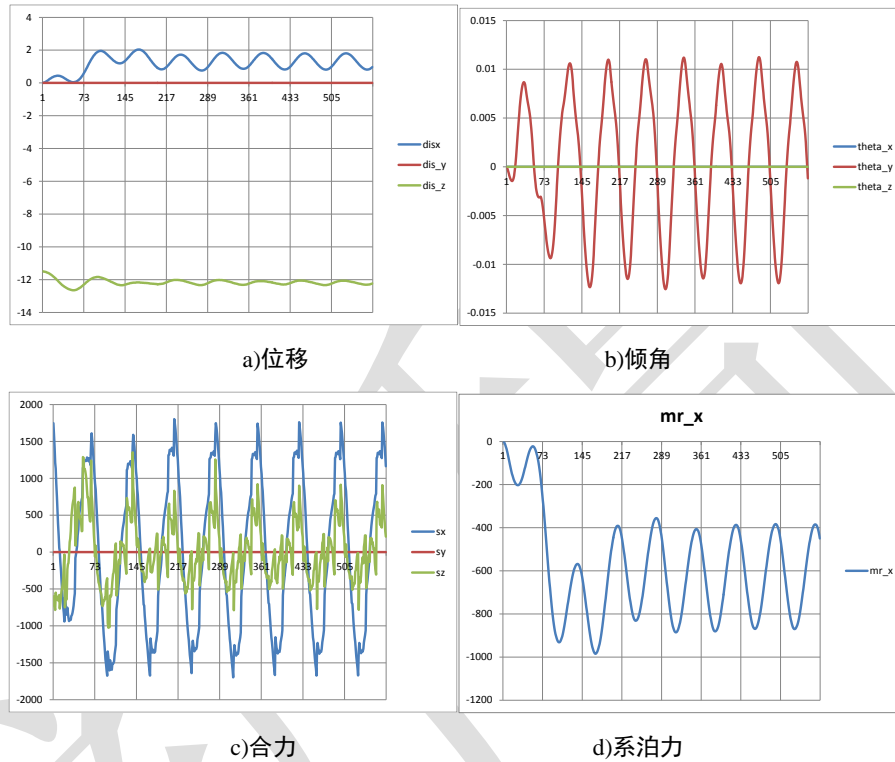


图 4.2.4.2 时域分析载荷及位移时历曲线

4.2.4.3 计算作用在设施上的波浪力（忽略由平台引起的入射波浪的变形）的步骤如图 4.2.4.3-1 所示。

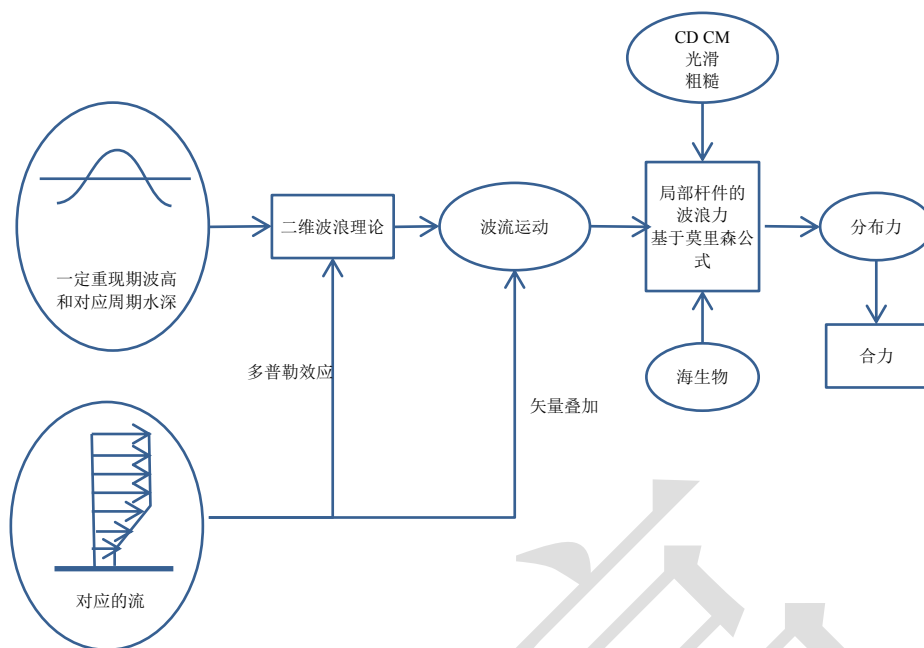


图 4.2.4.3-1 波浪力计算流程

对于某一给定的波浪方向，应首先规定设计波高和与其相应的波周期，水深和流速垂向分布，计算波浪力。计算波浪力应注意以下几点：

(1) 考虑流对波的多普勒 (Doppler) 效应，确定表观波浪周期 T_a ，对于特殊的、沿水深均匀分布的流（水下 50 米或更深），可以按照图 4.2.4.4-2 以 $d/(gT^2) > 0.01$ 无量纲 T_i/T_a 的形式求解表观周期与波浪周期的关系。对于 $d/(gT^2)$ 更小，可采用如下公式：

$$\frac{T_i}{T_a} = 1 + \frac{V_{in-line}}{\sqrt{gd}}$$

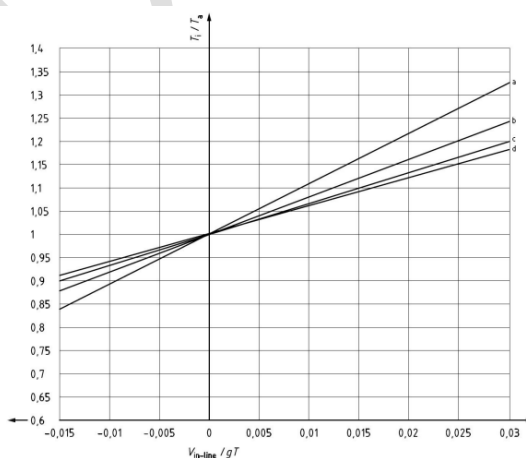
式中： T_i ——波浪周期，s；

T_a ——表观周期，s；

$V_{in-line}$ ——波浪方向的流速分量，m/s；

g ——重力加速度，取 9.81m/s^2 ；

d ——水深，m。



说明：

a $d/gT^2 = 0.01$

c $d/gT^2 = 0.04$

b $d/gT^2 = 0.02$

d $d/gT^2 = 0.10$

注：可采用 $T = T_a$ 或 $T = T_i$ 计算 d/gT^2 及 $V_{in-line}/gT$

图 4.2.4.3-2 稳定流导致的多普勒频移 - 固有周期和表观周期的关系

(2) 对一个特定的波高、水深和表观周期, 根据《海上移动平台入级规范》(2023) 第 2 篇 2.3.4 选择合适的波浪理论确定二维波浪运动;

(3) 由波浪引起的水质点的水平方向速度和加速度按波浪运动系数折减, 波浪运动系数主要反映波浪的方向性散射。观测表明, 对热带风暴波浪运动, 波浪运动系数的范围在 0.85~0.95, 对温带风暴, 其范围为 0.95~1.0。在开敞海域, 波浪的折射和绕射效应不改变波浪的散布特性, 建议采用表 4.2.4.3 给出的散布系数。

开敞海域条件下的运动系数 表 4.2.4.3

风暴类型或区域	运动系数
低纬度季风 (一般 $ \psi < 15^\circ$)	0.88
热带气旋 ($ \psi < 40^\circ$)	0.87
温带风暴 ($36^\circ < \psi < 72^\circ$ 之间)	$1.0193 - 0.00208 \psi $

注: ψ 为地理纬度。

(4) 局部流速的分布与波浪运动矢量叠加得到莫里森公式使用的局部水质点速度和加速度;

(5) 海生物拖曳力和惯性力系数详见 4.2.2.5;

(6) 通过等效莫里森杆或者离散网片方法计算网衣的波浪力, 详见 4.2.6;

(7) 利用莫里森公式计算所有杆件波浪力。

(8) 由局部力的矢量和计算设施整体受力。

4.2.4.4 对于单个杆件, 考虑到波面的影响, 可按照固定间隔离散多个点计算波浪力, 之后求和得到合力。如杆件离散为多个节点, 见图 4.2.4.4, 杆件承受的合力 F 可通过下式计算:

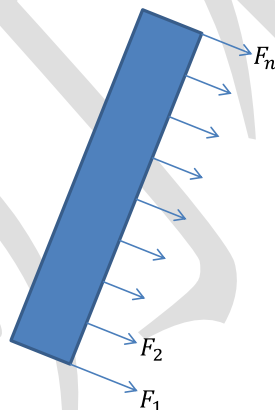


图 4.2.4.4 杆件离散示意图

$$F = \left(\sum_{i=1}^n F_i - \frac{1}{2}(F_1 + F_n) \right) \frac{L}{n-1}$$

式中: F ——合力, kN;

F_i ——第 i 个点的波浪力, kN/m;

F_1 ——起始点的波浪力, kN/m;

F_n ——结束点的波浪力, kN/m;

L ——杆件长度, m;

n ——离散点的编号, 从 1 开始到 n , 共计 n 个。

4.2.4.5 时域分析时应考虑波流联合作用、杆件出水入水、自由液面形状等产生的非线性因素。

4.2.4.6 按照特定相位间隔输出一个周期内的载荷, 或考虑整体最大水平载荷、单个杆

件最大载荷等因素输出特定时刻的载荷，用于结构强度校核。

4.2.5 时域随机波分析方法

4.2.5.1 对于漂浮式桁架养殖设施，应考虑平台系泊系统的影响，计算设施在随机海况波浪联合作用下的载荷和运动。

4.2.5.2 随机海况可以采用波谱描述，参数包括有义波高 H_s 和跨零周期 T_z 或其他特征周期。

4.2.5.3 常用的波谱有 Pierson-Moskowitz 单参谱（以下简称“P-M 谱”）和 JONSWAP 波浪谱。P-M 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分析。波浪模拟时应考虑波浪在方向上的扩散（三维特性），如不考虑方向的扩散可以按照 4.2.4.3（3）所述的波浪运动系数对水质点速度、加速度进行折减。

4.2.5.4 各分析工况的模拟时长通常应不小于 3 小时，考虑设施受到的波浪力、网衣载荷、惯性力、重力、浮力、系泊力，通过考察整体最大水平载荷、单个杆件最大载荷等因素输出特定时刻或全时程的载荷校核结构强度。时域分析的波浪力计算流程见图 4.2.5.4。

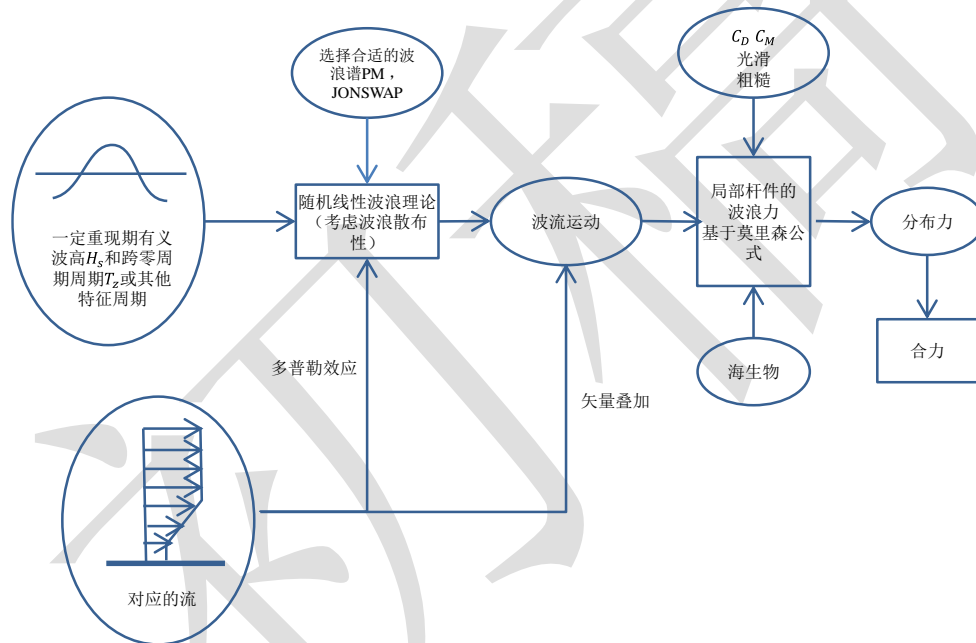


图 4.2.5.4 随机波波力计算流程

4.2.5.5 推荐取不少于 5 个随机种子进行时域数值模拟，以避免随机波分析方法中载荷不确定的不利影响。

4.2.5.6 网衣载荷推荐使用十字交叉柔性结构进行模拟，柔性结构刚度与网衣整体刚度保持一致。

4.2.6 网衣载荷

4.2.6.1 网衣载荷计算时可以忽略惯性力。

4.2.6.2 在校核养殖设施总体结构强度时，网衣载荷计算模型可不考虑网衣本身的运动变形，简化为与浮体为一体的刚体运动模型；在校核挂网结构局部强度时，网衣载荷计算模型可作为柔性杆件考虑。

4.2.6.3 网衣可等效为莫里森杆件，等效莫里森杆件的 C_{DE} 值可以通过如下公式计算：

$$C_{DE} = C_D A_{net} / A_{mrs}$$

式中： C_D ——基于轮廓面积的网衣拖曳力系数；

A_{net} ——莫里森杆件的单位长度上承担的网衣轮廓面积， m^2/m ；

A_{mrs} ——莫里森杆件单位长度上投影面积，对于圆管等于其直径， m^2/m 。

推荐采用与短边平行的莫里森杆或十字交叉莫里森杆。当使用单根莫里森杆件模拟整片网衣时， A_{net} 直接取垂直于莫里森杆方向的网片的宽度。

使用其他莫里森杆件拖曳力系数时，应确保整体网衣载荷一致。常见等效方法及要求如下：

(1) 网衣直接等效到主结构莫里森单元上：任意迎浪方向折算后拖曳力应为所连接网衣载荷合力的包络值；

(2) 网衣直接等效为虚拟刚性莫里森单元并考虑面内张力；

(3) 网衣等效为柔性莫里森单元：莫里森单元最少应为横竖交叉的十字交叉莫里森单元。

4.2.6.4 可采用离散网片算法，将网片划分为多个小网片后逐个计算换算到网片支撑杆件上，见图 4.2.6.4。主要步骤如下：

(1) 根据杆件定义网片，一般选择两个长边杆件定义网片。

(2) 根据杆件几何位置，定义多个虚拟杆。

(3) 将虚拟杆离散成多个点，每个点代表一个细小的网片。

(4) 根据水质点相对速度以及网片法向，计算离散点的网片的阻力、升力值。阻力系数、升力系数按照试验数据选取，或根据附录 3 3.2.3 估算。

(5) 根据力的大小及位置，按照简支梁的方式，保证力矩平衡，分别计算虚拟杆两端的支反力。

(6) 计算支反力合力垂直于虚拟杆方向的分量，面内张力按照该分量的 3 倍估算。

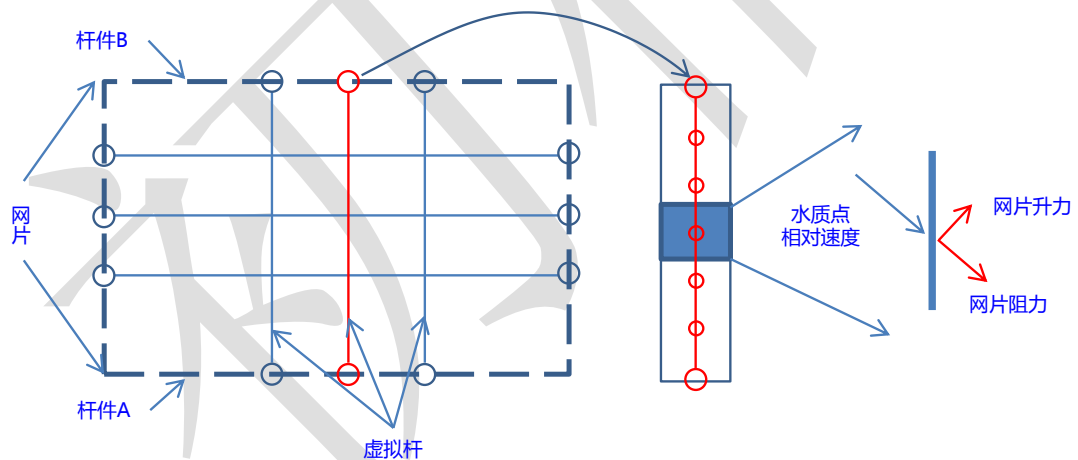


图 4.2.6.4 离散网片载荷

4.2.6.5 网衣水动力系数是计算网衣受力的关键指标，网衣的拖曳力系数 C_D 一般由网衣供应商根据实验提供。如无数据，可根据养殖指南附录 3 3.2.3 的相关要求计算。

4.2.6.6 海生物附着会导致网衣载荷几何倍数的增加，分析时应考虑海生物附着的不利影响。在操作手册中应明确海生物附着设计限制条件，并根据该限制条件制定海生物清理计划。

4.2.6.7 在校核网衣连接部分的局部强度时，网衣承受的水质点最大速度 u_x ，可取为时域分析垂直于网片的相对速度极值，也可通过最大波高的公式保守计算：

$$u_w = \frac{\pi H \cosh(k(z+d))}{T \cosh(kd)}$$
$$u_x = u_w + u_c + u_n$$

式中： u_w ——波浪产生水质点速度，m/s；

z ——高度位置，m，水面处为0，向上为正向下为负；

H ——规则波的波高，可取最大波高，见4.2.2.1，m；

T ——规则波的周期，s；

k ——波数；

d ——水深，m

u_n ——设施运动速度，可取为水动力分析的设施网衣处运动的最大值，或者根据水动力分析在该频率、浪向、相位的瞬时值，m/s，瞬时值具有方向性，此时 $u_x = u_w + u_c - u_n$ 。

u_c ——流速，m/s。

4.2.6.8 网纲线的张力一般远大于网线，在校核网衣与结构连接处的强度时，可以假定所有载荷由网纲线承担，单位长度上承担的拖曳力 F_D 按照下式计算。

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho S u_x |u_x|$$

式中： C_D ——网衣拖曳力系数；

u_x ——水质点相对速度，可按照4.2.6.7估算；

S ——单个网纲线承担载荷间距，可取网纲线间距 S_{rope} ，或按照网纲和网线的刚度计算，m；

$$S = S_{rope} \frac{k_{rope}}{n k_{line}}$$

S_{rope} ——网纲线的间距，m；

k_{rope} ——网纲线的刚度，kN/m；

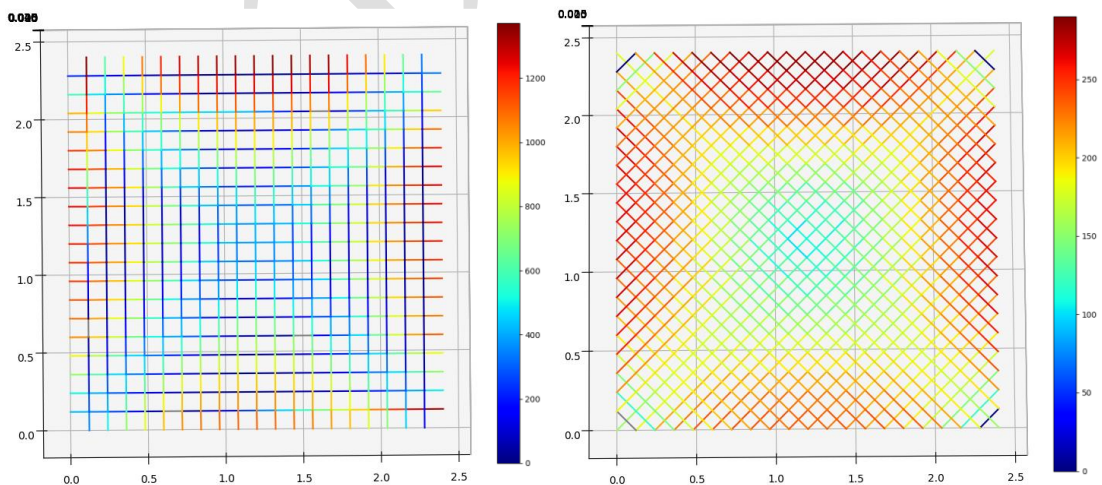
n ——网纲线间距内网线的个数；

k_{line} ——网线的刚度，kN/m，如果菱形布置，可以等效为 $\sqrt{2}/2 k_{line}$ 。

4.2.6.9 由于网衣特性，面内张力一般远大于拖曳力，如采用莫里森杆模拟网衣时，需额外增加网纲线的面内张力，此时可忽略端部弯矩。面内张力可按照数值模拟方式估算。对于超高分子聚乙烯纤维的网纲线，面内张力可以按照3倍的拖曳力进行估算。

4.2.6.10 考虑到遮蔽效应的影响，双层网衣中位于波流作用方向后方网片的载荷会下降，可使用遮蔽系数对载荷进行折减，遮蔽系数应通过试验或者数值模拟方式确定，并经CCS认可。

4.2.6.11 可以采用集中质量法来计算网纲线和网线张力分布典型的网线的张力分布见图4.2.6.11。



(a) 垂直布置网衣张力分布

(b) 斜向布置网衣张力分布

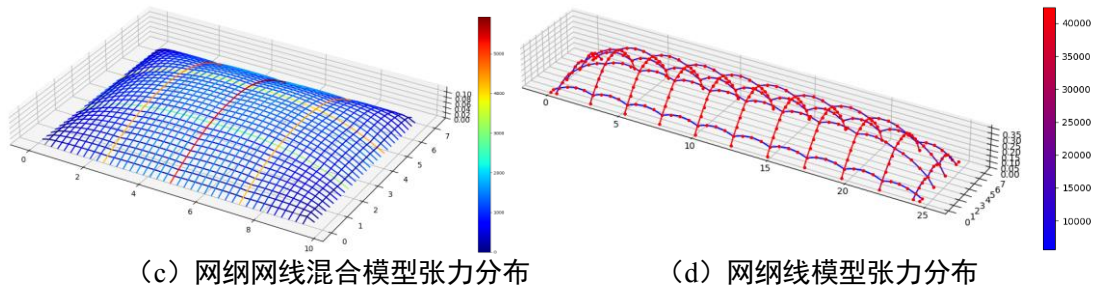


图 4.2.6.11 典型网片张力分布示意图

4.2.6.12 可使用有限元法计算计算网纲线和网线张力分布，建议采用杆单元（rod）模拟网纲线，节点铰接不传递弯矩，将节点附近的载荷施加到节点上。根据网纲刚度设置杆单元面积、弹性模量和密度。与船体连接处作为边界条件限制位移，采用有限元法求解网纲线的张力和位移。载荷及边界条件见图 4.2.6.12。

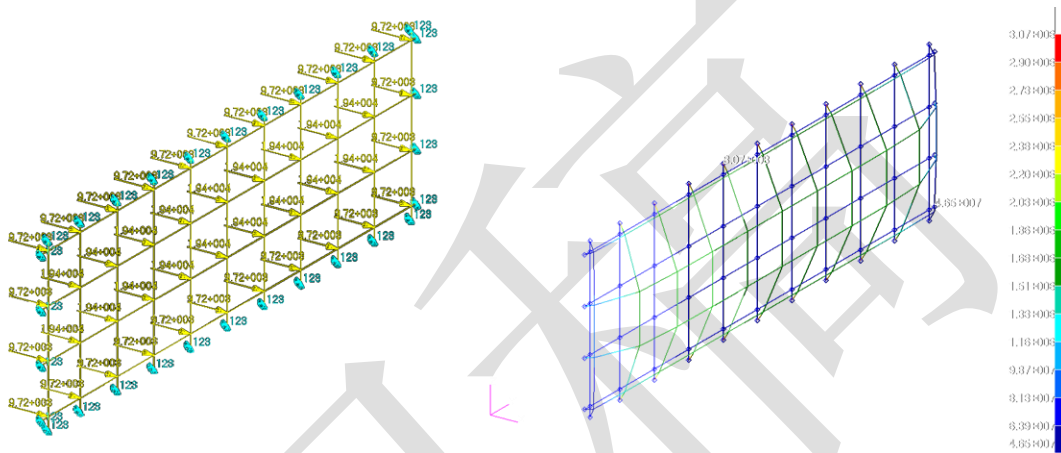


图 4.2.6.12 有限元法分析网纲张力分布

4.2.7 管节点构造要求

4.2.7.1 对于桁架类设施，钢结构设计建议参考《SY/T 10030 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》的规定，管节点的设计还应注意以下几点：

- (1) 管节点处应适当加强，例如增加板厚、加强环、增加直径等方法；
- (2) 尽量避免同尺寸圆管相交；
- (3) 尽量避免水密舱壁和杆件垂直相交；
- (4) 尽量避免多个杆件相交在同一个节点上；
- (5) 与浮体相连的管节点，建议设置肘板加强和反向加强；
- (6) 建议浮体连接的管节点处设置隔离空舱和渗漏探测系统，防止进水后导致稳性丧失。
- (7) 在设计时，建议水平构件尽量布置在远离水线面的位置，以减少设施承受的载荷。

4.2.8 有限元分析

4.2.8.1 有限元分析的载荷，除了自重、压载、浮力等静载荷外，还需要考虑由于波浪引起的波浪力、网衣载荷、波面变化导致的浮力变化、惯性力（如适用）、系泊力（如适用）等动载荷。

4.2.8.2 可使用梁单元进行总体强度分析，可参考《SY/T 10030 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》来校核结构及管节点强度，还应采用壳单元建模校核管节点的局部强度。

4.2.8.3 在采用壳单元模拟杆件时，应使用压力来施加波浪力，此时单位长度上的压力

合力应等于预期的波浪力,压力可采用余弦分布方式模拟,典型波浪力压力分布见图 4.2.8.3。对于圆管,其压力可以按照下式估算:

$$p = \frac{2F}{\pi D} \cos\theta$$

式中: p ——压力, kPa;

F ——波浪力, kN/m;

D ——圆管的外径, m;

θ ——压力方向和波浪力方向的夹角, rad。

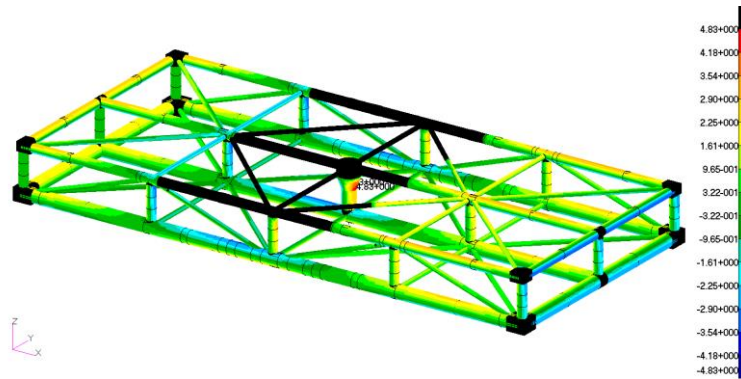


图 4.2.8.3 莫里森载荷压力示意图

4.2.8.4 有限元分析的边界条件设置

- (1) 对于固定式,可约束入泥处的节点位移;
- (2) 对于漂浮式,可约束系泊系统连接处的节点位移。

4.2.8.5 有限元分析中网衣载荷

- (1) 如使用柔性结构计算网衣载荷,结构分析有限元中可不建立网衣单元,直接施加柔性结构拉力;
- (2) 如使用刚性单元计算网衣载荷,需要额外施加面内张力;
- (3) 也可以根据时域分析结果,直接在网衣连接处施加网衣载荷,包含面内张力和拖曳力;
- (4) 如果单个杆件连接多片网衣,建议考虑单片网衣张力和相邻网衣张力组合两种情况。

第 3 节 半潜类养殖设施载荷计算

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 半潜类养殖设施的结构型式与受力特点和半潜式钻井平台类似,因此可采用等效设计波法计算载荷。

4.3.1.2 在校核半潜类养殖设施总体强度时,可采用频域分析方法进行载荷计算:

- (1) 不考虑网衣的影响,采用基于势流理论的频域分析方法计算设计波作用下的浮体运动及载荷响应;
- (2) 网衣载荷可根据莫里森公式进行估算,参见 4.2.6。

4.2.1.3 本节未予规定者,可参考本附录第 2 节的适用要求。

4.3.2 载荷

4.3.2.1 总体强度分析时,可采用典型半潜式平台的等效设计波法,特征载荷至少包含下壳体间的分离力与纵向剪切力、扭矩、垂向弯矩和甲板的横向、纵向与垂向加速度,其他

特征载荷根据经验选择。

4.3.2.2 总体强度分析时,网衣及其支撑结构的载荷,可根据设施的运动情况、设计波、流速等估算,面内张力按照 4.2.6.9 的要求计算。如采用拖曳力线性化的方式估算网衣及其支持结构波浪力,拖曳力线性化系数取值应尽可能保守,可按照下式计算:

$$C = u_m + u_c + u_n = \frac{H\pi}{T} + u_c + u_n$$

式中: C ——拖曳力线性化系数;

u_m ——波浪最大水质速度, m/s;

u_c ——流速, m/s;

u_n ——设施对应位置处的运动速度, m/s;

H ——等效设计波的波高, m;

T ——对应的周期, s。

在有充分依据的水动力预报结果时,拖曳力线性化系数也可以通过水动力预报的最大水质点相对速度替代。

4.3.2.3 除总体强度分析外,还应单独校核网衣支撑结构的局部强度,载荷见 4.2.6.3 至 4.2.6.9。

4.3.2.4 设计时应考虑海生物附着导致载荷增加情况。

第 4 节 浮体桁架混合类养殖设施载荷计算

4.4.1 一般要求

4.4.1.1 对于浮体桁架混合类养殖设施,由于小尺度构件和网衣载荷的影响不可忽略,需统筹考虑板壳结构和桁架结构的载荷计算。

4.4.1.2 可采用频域和时域分析相结合的方式分别考虑板壳结构和桁架结构的强度校核:

(1) 板壳结构强度分析:可采用基于势流理论的频域分析方法计算平台运动及载荷响应,但需使用考虑网衣和桁架的时域分析的结构对频域分析的结果进行修正。伴随网衣载荷和桁架载荷,可以根据频域分析的波浪下,设施的运动、波浪、流的参数利用莫里森公式进行估算。

(2) 桁架结构强度分析:按照确定性方法,考虑网衣等载荷,采用莫里森公式计算桁架结构的载荷和网衣载荷。伴随板壳结构的载荷和运动取自势流理论频域分析在对应规则波的结果计算。

4.4.1.3 可采用时域分析方法,同时考虑小尺度构件的波浪力和势流理论计算的波浪力。

4.4.1.4 可采用多体耦合分析方法,将不连续的板壳结构作为单独浮体与桁架进行连接,进行整体的多体耦合分析。

4.4.1.5 浮体桁架混合类养殖设施具有较复杂的水动力特性,推荐进行水池试验并通过试验校准数值模拟模型;在缺少水池试验或水池试验不足以表征平台总体运动性能时,浮体的运动、载荷及相关水动力参数均应在保守条件下考虑。

4.4.1.6 本节未予规定者,可参考第 2 节的适用要求。

4.4.2 载荷

4.4.2.1 强度分析载荷的要求如下:

(1) 使用时域分析方法时,可对时域载荷瞬态进行结构强度分析并汇总瞬态分析的包络应力值作为校核结果,也可对典型框架和节点进行关键载荷结构强度分析并取包络应力值。

(2) 如使用 4.4.1.2 所述方法, 根据时域分析结果修正频域分析的方法, 可以按照以下步骤进行:

- a) 计算相同的规则波下的响应;
- b) 对比频域和时域分析的运动值和载荷值;
- c) 调整阻尼等系数, 以确保频域的运动极值和载荷合力等于或略大于与时域分析值。如采用拖曳力线性化的方式估算波浪力, 见 4.3.2.2。

4.4.2.2 应考虑海生物附着导致载荷增加的情况。如桁架结构使用直径小于 0.5m 的圆管, 海生物附着情况下其拖曳力系数将进一步上升, 取值应经 CCS 认可。

4.4.2.3 网衣载荷计算方法参见本附录 4.2.6。

4.4.3 超细圆管桁架结构的特殊考虑

4.4.3.1 对于直径 $<0.5\text{m}$ 的圆管桁架结构, 应有良好的防腐措施, 防止发生腐蚀穿孔或腐蚀引起结构失效。

4.4.3.2 重点关注与浮体相连的桁架处的局部强度、疲劳强度, 此处失效可能会导致进水。