ICS 19.020
CCS P20

团 体 标 准

T/CIN 038—2024

滨海工程柔性网具结构模拟试验技术规范

Technical Code of Modelling Test for flexible netting structures in Coastal Engineering

2024－07－31 发布 2024－10－31 实施

中国航海学会 发 布

目　　次

前　　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国航海学会提出并归口。

本文件起草单位：交通运输部天津水运工程科学研究所、大连理工大学、深圳中广核工程设计有限公司。

本文件主要起草人：解鸣晓、许条建、侯志强、孙振祥、王恒、崔成、袁春光、李泽、潘文博、阳志文、马玉祥、董国海、唐鸣夫、祝奇超、罗岁丰、吴庆旺、陈静、陈文焕。

滨海工程柔性网具结构模拟试验技术规范

1 范围

本文件规定了滨海工程柔性网具结构模拟试验的基本要求、物理模型试验和数值模拟计算的要求。

本文件适用于滨海工程柔性网具结构涉及的水动力响应模拟试验，内河相关工程柔性网具结构模拟试验可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 40749—2021 海水重力式网箱设计技术规范

JTS 145—2015 港口与航道水文规范

JTS/T 231—2021 水运工程模拟试验技术规范

SC/T 4011—1995 拖网模型水池试验方法

SC/T 4014—1997 拖网模型制作方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

滨海工程柔性网具结构模拟试验 modelling test for flexible netting structures in coastal engineering

复演和预报滨海工程中涉及的柔性网具结构在波浪、水流等流体动力作用下的运动响应、受力以及对周围水动力环境的影响等的物理模型试验或数值模拟计算。

3.2

几何相似 Geometric Similarity

原型与模型对应的几何尺度的比值为一定常数。

3.3

重力相似 gravity similarity

原型与模型的惯性力与重力的比值相等，又称为弗劳德（Froude）相似。

3.4

弹性相似 elasticity similarity

原型与模型的惯性力与弹性力的比值相等，又称为柯西（Cauchy）相似。

3.5

网衣 net

由柔性网线按照一定的编织工艺加工而成的具有网目结构的片状编织物。特征参数包括目脚长度、网线直径（丝径）和缩结系数等。

3.6

网纲 rope

由较粗的绳索构成，用于保持网具基本形态的骨架结构。

3.7

网具　netting system

由网衣、网纲构成的网状结构。

3.8

系泊绳索　mooring line

用于固定网具位置的缆绳。

3.9

墩（桩）台　pier

用于固定网具位置的主要固定式构件。

3.10

锚环　anchor

用于连接系泊绳索的构件。

3.11

锚碇块　anchorage block

沉于水底，用于固定网具位置的构件。

3.12

浮球（筒）　mooring buoy

浮于水面，用于固定网具位置的构件。

3.13

锚泊结构　mooring structure

由墩（桩）台、锚环、锚碇块和浮球（筒）等锚泊构件组成，用于固定网具位置的设施结构。

3.14

柔性网具结构　flexible netting structure

由网具、系泊绳索和锚泊结构组成的系统。

3.15

网目群化　mesh grouping

将原型网的网线直径和网目尺寸同比例放大，简化为网目数量减少的等效模型网。

3.16

缩尺效应　scale effect

物理模型试验受缩尺的限制和影响不能同时满足全部相似条件，而造成模型值与原型值之间偏差的现象。

3.17

边界条件　boundary conditions

物理模型或数值模拟中边界上水位、流和波浪等控制条件。

3.18

初始条件　initial condition

物理模型或数值模拟开始时刻的水位、流和波浪等条件。

4 基本要求

开展滨海工程柔性网具结构模拟试验，应根据工程项目技术要求选用物理模型试验或数值模拟计算，必要时可同时进行物理模型试验和数值模拟计算。

研究大纲，物理模型制作精度，试验资料记录及整理，报告编写、审查及资料归档应符合JTS/T 231—2021中3.2、3.3、3.4和3.5的规定。

5 柔性网具结构水动力响应物理模型试验

5.1 基本资料

柔性网具结构水动力响应物理模型试验的基本资料，除包括JTS/T 231—2021要求的地形、水文、分析资料和工程设计方案等资料外，还应涵盖网具、系泊绳索、锚泊结构等的规格、材质以及网具堵塞类型、程度等资料。

5.2 模型设计

5.2.1 柔性网具结构

典型的柔性网具结构如图1所示，包括由网衣和网纲组合的网具，系泊绳索以及由墩（桩）台、锚环、锚碇块、浮球（筒）组成的锚泊结构。

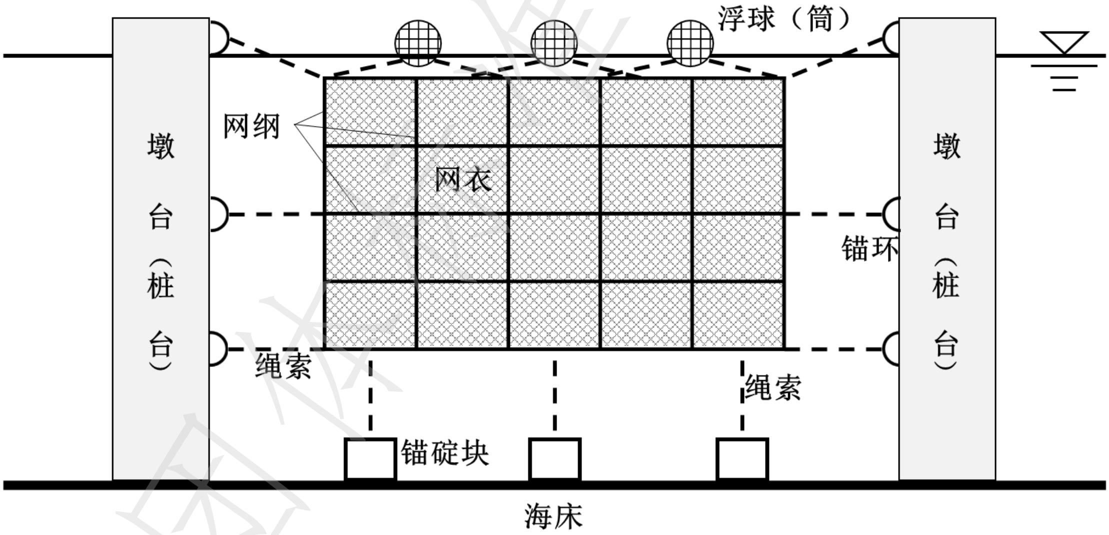


图 1 典型柔性网具结构示意图

5.2.2 基本比尺关系

5.2.2.1 相似准则

试验动力条件为单纯水流作用时，模型设计应符合SC/T 4011—1995中的相似准则；动力条件为波浪和水流联合作用时，模型设计应满足几何相似、重力相似条件和其他相关比尺的要求。

5.2.2.2 几何相似

整体几何比尺关系按式（1）确定：

$$\lambda_l = l_p / l_m \quad (1)$$

式中：

λ_l—— 整体几何比尺；

l_p—— 原型整体几何尺度，单位为米（m）；

l_{m}—— 模型整体几何尺度，单位为米（m）。

5.2.2.3 **重力相似**

重力相似条件下，速度比尺关系按式（2）确定：

$$\lambda_{\mathrm{v}} = \lambda_{\mathrm{l}}^{1/2} \quad (2)$$

式中：

λ_{v}—— 速度比尺。

5.2.2.4 **其他相关比尺**

重力相似条件下，时间、波周期比尺关系，力比尺关系，频率比尺关系，压强比尺关系和流量比尺关系分别按式（3）~ 式（7）确定：

$$\lambda_{\mathrm{t}} = \lambda_{\mathrm{T}} = \lambda_{\mathrm{l}}^{1/2} \quad (3)$$

$$\lambda_{\mathrm{F}} = \lambda_{\mathrm{l}}^{3} \quad (4)$$

$$\lambda_{\mathrm{f}} = \lambda_{\mathrm{l}}^{-1/2} \quad (5)$$

$$\lambda_{\mathrm{p}} = \lambda_{\mathrm{l}} \quad (6)$$

$$\lambda_{\mathrm{Q}} = \lambda_{\mathrm{l}}^{5/2} \quad (7)$$

式中：

λ_{t}—— 时间比尺；

λ_{T}—— 波周期比尺；

λ_{F}—— 力比尺，包括系泊绳索拉力、水流作用力、波浪作用力和总力等；

λ_{f}—— 频率比尺；

λ_{p}—— 压强比尺，包括静水压强和动水压强等；

λ_{Q}—— 流量比尺，包括取水流量等。

5.2.3 **网具相似模拟**

5.2.3.1 **网衣几何比尺**

为适应网具的缩尺模拟，网衣几何比尺不与整体几何比尺一致，网衣几何比尺关系按式（8）确定：

$$\lambda_{\mathrm{l}}' = a_{\mathrm{p}}/a_{\mathrm{m}} = d_{\mathrm{p}}/d_{\mathrm{m}} = \delta_{\mathrm{p}}/\delta_{\mathrm{m}} \quad (8)$$

式中：

λ_{l}'—— 网衣几何比尺；

a_{m}—— 模型网目长度，单位为米（m）；

d_{m}—— 模型网线直径，单位为米（m）；

δ_{m}—— 模型网纲直径，单位为米（m）；

a_{p}—— 原型网目长度，单位为米（m）；

d_{p}—— 原型网线直径，单位为米（m）；

δ_{p}—— 原型网纲直径，单位为米（m）。

5.2.3.2 **网衣密实度相似模拟**

5.2.3.2.1 模型网衣与原型网衣应满足密实度相似，如图 2 所示，网衣密实度比尺关系按式（9）确定：

$$\lambda_{\mathrm{S}} = S_{\mathrm{np}}/S_{\mathrm{nm}} = 1 \quad (9)$$

式中：

λ_{S}—— 网衣密实度比尺；

S_{np}—— 原型网衣密实度；

S_{nm}—— 模型网衣密实度。

5.2.3.2.2 网衣密实度计算可采用十字单元法，如图 3 所示。网衣密实度按式（10）和（11）确定：

$$A_{\mathrm{c}} = (2a - 2Kd)d + (Kd)^2 = (2a - 2Kd + K^2 d)d \quad (10)$$

$$S_{\mathrm{n}} = A_{\mathrm{c}}/a^2 \quad (11)$$

式中：

A_c—— 网衣十字单元内阻水面积在网衣平面投影，单位为平方米（m²）；

d —— 网线直径，单位为米（m）；

a —— 网目长度，单位为米（m）；

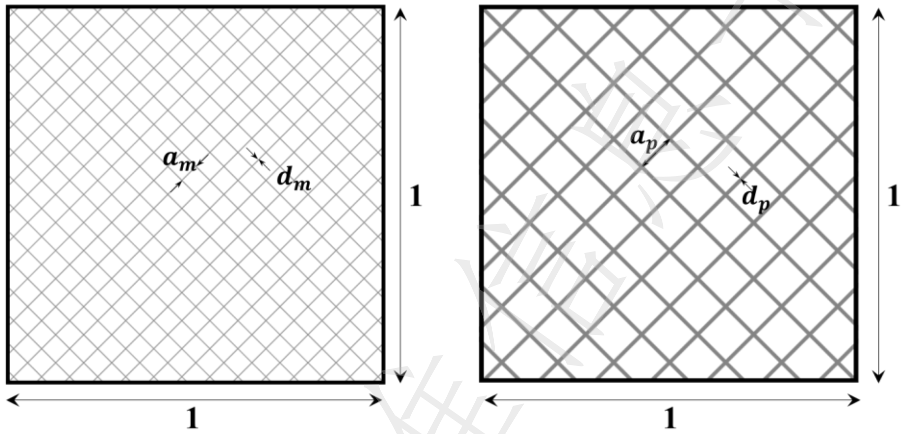
K —— 网衣结节直径与网线直径的比值，无结网时，$K=1$；

S_n—— 网衣密实度。

5.2.3.2.3 当模型网衣与原型网衣具有相同的密实度S_n时，满足式（12）或（13）所示的比例关系：

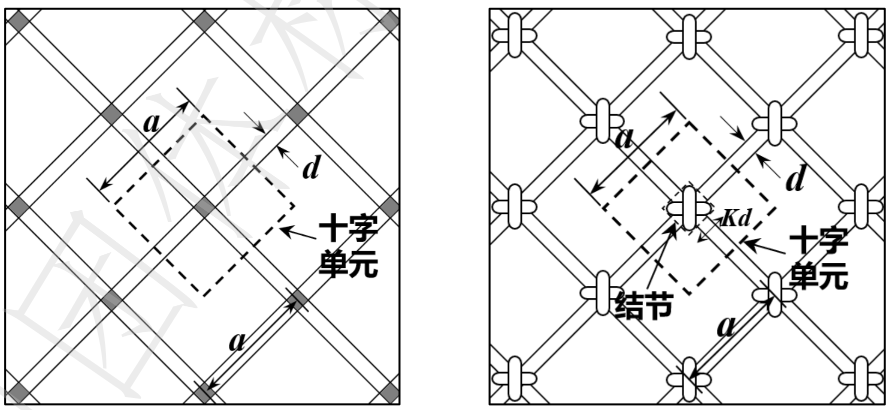
$$a_p/a_m = d_p/d_m \tag{12}$$

$$d_p/a_p = d_m/a_m \tag{13}$$



a）原型网衣　　b）模型网衣

图 2 网衣密实度相似示意图



a）无结网衣　　b）有结网衣

图 3 网衣十字单元示意图

5.2.3.3 网具浮重比相似模拟

模型网具与原型网具应满足浮重比相似，浮重比比尺关系按式（14）确定：

$$\lambda_{FG} = r_p/r_m = 1 \tag{14}$$

式中：

λ_{FG}—— 网具浮重比比尺；

r_p —— 原型网具浮力与重力的比值，F_{Bp}/G_p；

r_m—— 模型网具浮力与重力的比值，F_{Bm}/G_m；

F_{Bp}—— 原型网具浮力，单位为牛顿（N）；

F_{Bm}—— 模型网具浮力，单位为牛顿（N）；

G_p—— 原型网具重力，单位为牛顿（N）；

G_{m}—— 模型网具重力，单位为牛顿（N）。

5.2.4 系泊绳索相似模拟

5.2.4.1 模型系泊绳索与原型系泊绳索应满足长度相似、质量相似和弹性相似。

5.2.4.2 模型系泊绳索质量相似模拟中，系泊绳索单位长度质量比尺关系按式（15）和（16）确定：

$$\lambda_{\mathrm{W}} = \lambda_{\mathrm{l}}^2 \tag{15}$$

$$\lambda_{\mathrm{W}} = \frac{W_{\mathrm{p}}}{W_{\mathrm{m}}} = \frac{\rho_{\mathrm{p}}\pi\left(d_{\mathrm{lp}}/2\right)^2}{\rho_{\mathrm{m}}\pi(d_{\mathrm{lm}}/2)^2} = \frac{\rho_{\mathrm{p}}{d_{\mathrm{lp}}}^2}{\rho_{\mathrm{m}}{d_{\mathrm{lm}}}^2} \tag{16}$$

式中：

λ_{W}—— 系泊绳索单位长度质量比尺；
W_{p}—— 原型系泊绳索单位长度质量，单位为千克每米（kg/m）；
W_{m}—— 模型系泊绳索单位长度质量，单位为千克每米（kg/m）；
ρ_{p}—— 原型系泊绳索材质密度，单位为千克每立方米（kg/m^3）；
ρ_{m}—— 模型系泊绳索材质密度，单位为千克每立方米（kg/m^3）；
d_{lp}—— 原型系泊绳索直径，单位为米（m）；
d_{lm}—— 模型系泊绳索直径，单位为米（m）。

5.2.4.3 模型系泊缆绳弹性相似模拟中，系泊绳索抗拉刚度比尺关系按式（17）和（18）确定：

$$\lambda_{\mathrm{EA}} = (EA)_{\mathrm{p}}/(EA)_{\mathrm{m}} = \lambda_{\mathrm{l}}^3 \tag{17}$$

$$EA = E\pi d_{\mathrm{l}}^2/4 \tag{18}$$

式中：

λ_{EA}—— 系泊绳索抗拉刚度比尺；
$(EA)_{\mathrm{p}}$—— 原型系泊绳索抗拉刚度，单位为牛顿（N）；
$(EA)_{\mathrm{m}}$—— 模型系泊绳索抗拉刚度，单位为牛顿（N）；
E—— 系泊绳索的有效弹性模量，单位为帕斯卡（Pa 或者 N/m^2）；
d_{l}——系泊绳索的直径，单位为米（m）。

5.2.5 锚泊构件相似模拟

对于墩（桩）台、锚碇块、浮球（筒）等锚泊构件的模型设计，除满足几何相似、质量相似外，还应满足锚碇块和浮球（筒）的重心位置相似和浮球（筒）的浮心位置相似。

5.2.6 网具堵塞相似模拟

5.2.6.1 堵塞相似

5.2.6.1.1 宜开展现场调研，了解网具堵塞物的类型、分布情况和堵塞程度。
5.2.6.1.2 堵塞物分布情况主要分为漂浮型、悬浮型和网线自生长型 3 种。
5.2.6.1.3 条件允许时，宜选原型实物对堵塞物进行模拟，且应满足模型堵塞物分布和堵塞程度（或堵塞率）与原型一致，模型堵塞物的质量与原型相似，堵塞物质量比尺关系按式（19）确定：

$$\lambda_{\mathrm{WB}} = (WB)_{\mathrm{p}}/(WB)_{\mathrm{m}} = \lambda_{\mathrm{l}}^3 \tag{19}$$

式中：

λ_{WB}—— 堵塞物质量比尺；
$(WB)_{\mathrm{p}}$—— 原型堵塞物质量，单位为千克（kg）；
$(WB)_{\mathrm{m}}$—— 模型堵塞物质量，单位为千克（kg）。

5.2.6.1.4 在无堵塞物调研资料或者条件不允许时，堵塞物的模拟可采用以下方式简化：对于漂浮型和悬浮型堵塞物，可采用不透水的轻质薄膜覆盖网具模拟；对于网线自生长型堵塞物，可采用密实度更高的网衣模拟。

5.2.6.2 平面型网具堵塞模拟

5.2.6.2.1 平面型网具堵塞率宜采用堵塞面积比描述，即堵塞物堵塞面积与静水条件下网具位置处过水

断面面积的比值，如图 4 所示，按式（20）计算：

$$k_{\mathrm{d}} = \frac{S_{\mathrm{b}}}{S_{\mathrm{c}}} \times 100\% \qquad (20)$$

式中：

k_{d}—— 平面型网具堵塞率；

S_{b}—— 堵塞面积，单位为平方米（m^2）；

S_{c}—— 网具位置处过水断面面积，单位为平方米（m^2）。

5.2.6.2.2 对漂浮型堵塞物，宜采用自水面垂直向下整体横向堵塞的方式，如图 4 所示。

5.2.6.2.3 对悬浮型堵塞物，宜采用均匀间隔堵塞的方式，包括横向、竖向、井格、网格等堵塞方式,如图 5 所示。

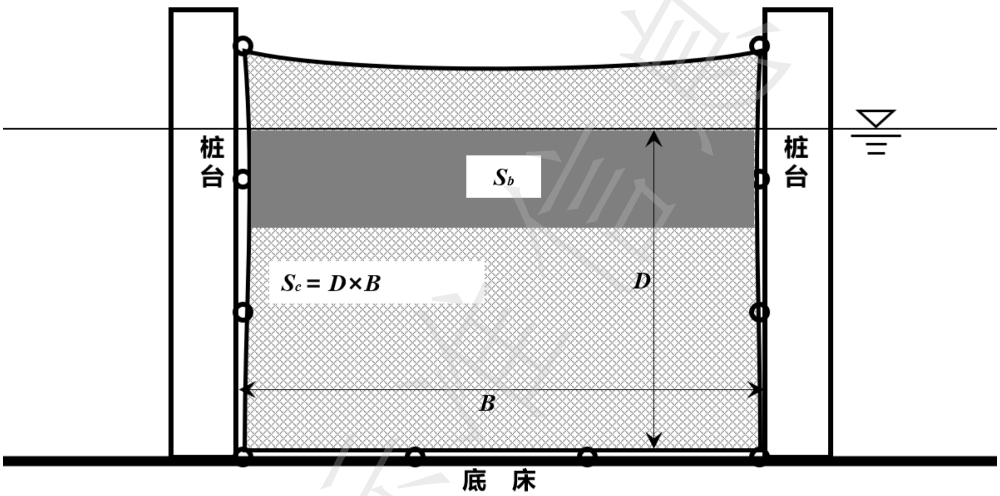
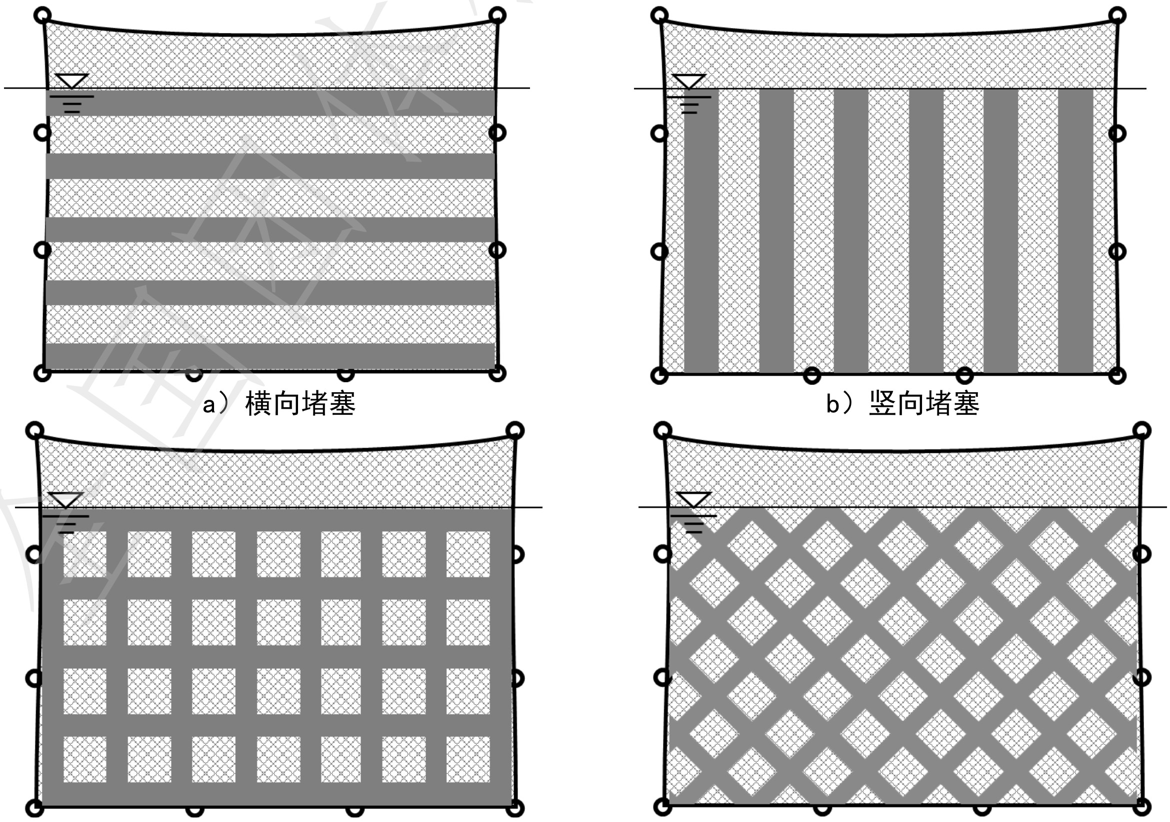


图 4 平面型网具堵塞示意图



c）井格堵塞　　　　　　　　d）网格堵塞

图 5 平面型网具均匀封堵方式示意图

5.2.6.3 网兜型网具堵塞模拟

5.2.6.3.1 网兜型网具堵塞率宜采用堵塞长度比描述，即堵塞物堵塞长度与网具总长度的比值，网兜堵塞方向为自兜尾向网兜开口方向，如图 6 所示，按式（21）计算：

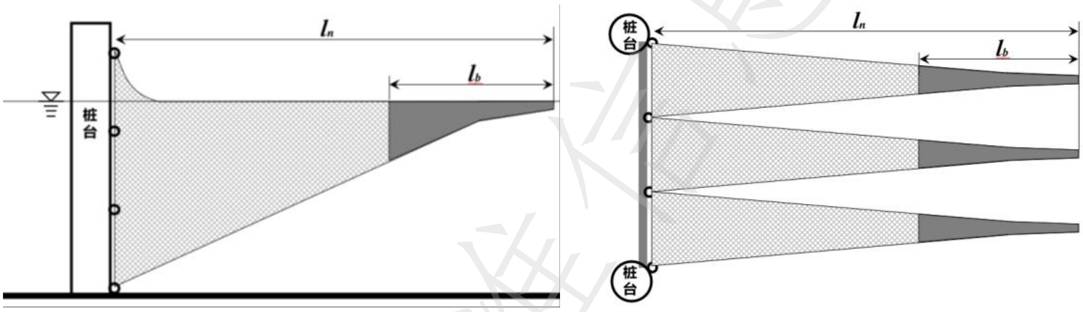
$$k_{\mathrm{l}}=\frac{l_{\mathrm{b}}}{l_{\mathrm{n}}}\times 100\% \quad (21)$$

式中：

k_{l}—— 网兜型网具堵塞率；

l_{b}—— 堵塞长度，单位为米（m）；

l_{n}—— 网具总长度，单位为米（m）。



a）立面图　　　　　　　　b）平面图

图 6 网兜型网具堵塞程度

5.2.6.3.2 网兜型网具的堵塞模拟，宜采用与网兜形状一致的非透水薄膜进行堵塞，应满足堵塞物质量相似要求。

5.2.7 试验类型选择

5.2.7.1 柔性网具结构水动力响应物理模型实验可分为整体模型试验和局部模型试验。

5.2.7.2 以总平面布置形式选取为目标的试验，宜采用整体模型试验。

5.2.7.3 以结构局部构件受力结果为目标的试验，宜采用局部模型试验。

5.2.8 模型比尺选取

5.2.8.1 模型比尺的选择应考虑以下因素影响，包括试验场地条件、试验对象尺度、动力条件、试验量测仪器等。

5.2.8.2 整体模型试验中，整体几何比尺λ_{l}不宜超过 60。

5.2.8.3 局部模型试验中，整体几何比尺λ_{l}不宜超过 20。

5.2.8.4 整体几何比尺与网衣比尺的比值（$\lambda_{\mathrm{l}}/\lambda_{\mathrm{l}}'$）不宜大于 10。

5.2.9 模型范围选取

5.2.9.1 整体模型试验宜在三维水池中进行，模型范围应包括试验要求研究完整的平面布置形式和对研究区域水动力要素有影响的水域；模拟范围根据试验水池和结构物尺度、波浪、水流等动力因素综合确定，水池边界位置应保证不受到结构物的影响。

5.2.9.2 局部模型试验宜在长直水槽中进行，模型范围应包括至少一组试验要求研究完整的柔性网具结构，尽可能避免水槽边界对动力环境的影响。

5.2.10 水动力条件模拟

根据研究目标所处水域的水动力特征，选择合理的水动力参数，应符合 JTS/T 231—2021 中 4.1，5.1 和 6.1 关于水动力模拟试验所需资料的相关规定。

水动力条件的模拟应符合 JTS/T 231—2021 中 4.4，5.4 和 6.4 的相关规定。

5.3 模型制作

5.3.1 模型网具制作可参照 SC/T 4014—1997，宜选取与原型网具相同的材质；
5.3.2 模型网具应保证与原型网具具有相同的装配工艺；
5.3.3 当需要测定锚碇块体上系泊绳索的拉力时，应保证锚碇块体在试验过程中不发生位移。
5.3.4 模型中的锚环应保证在试验中不发生位移。
5.3.5 除柔性网具模型外，模型地形和边界等制作应符合 JTS/T 231—2021 中 5.3 的相关规定。

5.4 模型率定试验

波浪和水流动力的率定试验应符合 JTS/T 231—2021 中 6.4 的相关规定。

5.5 试验数据采集和处理

5.5.1 应减小或避免放置的测量仪器对柔性网具结构运动的影响。
5.5.2 试验中宜同步测量柔性网具结构上游和下游的波面、流速、流向，系泊绳索拉力以及墩（桩）台的受力。
5.5.3 宜采用高速摄像机测量柔性结构的运动过程。
5.5.4 测量系泊缆绳拉力的仪器宜放在靠近柔性网具结构的一端，系泊点的位置应与原型相对应，并应尽量减小绳索拉力传感器自重对拉力测量结果的影响。
5.5.5 宜测量挂网墩（桩）台所受总力。
5.5.6 测量运动量高速摄像机的帧数频率不小于 50Hz。
5.5.7 试验中波面高度、水流的采样频率不小于 50Hz。
5.5.8 试验中绳索张力、墩（桩）台总力的采样频率不小于 100Hz。
5.5.9 传感器应通过检验和率定，技术指标应满足试验精度和稳定性的要求。
5.5.10 采用不规则波进行试验时，每组试验应至少重复 3~5 次，取其平均值作为代表值。根据需求，可进行系泊绳索张力和墩（桩）台总力等特征值统计和谱分析。
5.5.11 采用规则波进行试验时，试验应重复至少 3 次，累积波浪个数不宜少于 100 个。根据要求，可进行系泊绳索张力和墩（桩）台总力等平均值、1/3 大值平均值和最大值等特征值计算。
5.5.12 波浪数据采集和处理应符合 JTS/T 231—2021 附录 B 中的相关规定。

5.6 试验设备和测量仪器

试验中所需的设备和仪器应符合 JTS/T 231—2021 中 10.1，10.2，10.3 和 10.4 的相关规定。

5.7 其他说明

5.7.1 为了避免缩尺效应，条件允许时，宜开展 1:1 原型尺度试验。
5.7.2 当网衣比尺与整体比尺不一致时，宜采用不少于 3 组比尺的系列比尺试验，且系列比尺中最大比尺与最小比尺的比值不宜小于 4，以修正缩尺效应对试验结果的影响。

6 柔性网具结构水动力响应数值模拟方法

6.1 一般规定

开展柔性网具结构水动力响应数值模拟计算，应根据研究目的采用集中质量点模型或多孔介质模型。以柔性网具结构运动响应和受力为主要研究目的，宜采用集中质量点模型，可以模拟柔性网具结构具体的变形特征，还可以兼顾计算效率。以柔性网具结构动力响应对周围流场的影响为主要研究目的，宜采用多孔介质模型。

本文件主要介绍集中质量点模型。

6.2 集中质量点模型

6.2.1 网衣模型概化

将柔性网具结构主体的网衣概化为集中质量点模型，具体为将网线的质量集中于网目目脚的两端（端节点）和中间位置（中间节点），再将这些集中质量点采用无质量的弹簧进行连接，就得到网衣模

型，如图 7 所示。

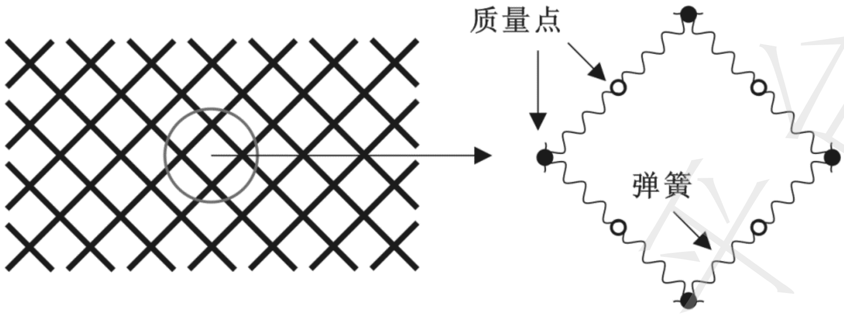


图 7 网衣集中质量点模型

6.2.2 网衣运动控制方程

对于模型化网衣的集中质量点，其运动控制方程见式（22）：

$$M\ddot{X} = M\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = F_\mathrm{T} + F_\mathrm{D} + F_\mathrm{I} + F_\mathrm{B} + G \quad (22)$$

式中：

M—— 质量点的质量，单位为千克（kg）；

X—— 质量点的位移，单位为米（m）；

F_T—— 作用于质量点的网目目脚张力，单位为牛顿（N）；

F_D—— 作用于质量点的拖曳力，单位为牛顿（N）；

F_I—— 作用于质量点的惯性力，单位为牛顿（N）；

F_B—— 作用于质量点的浮力，单位为牛顿（N）；

G—— 作用于质量点的重力，单位为牛顿（N）。

6.2.3 网衣受力分析

6.2.3.1 模型化柔性网衣所受的力，主要包括重力G，浮力F_B，网线弹性变形引起的目脚张力F_T和网衣所受水动力，水动力包括拖曳力F_D和惯性力F_I。

6.2.3.2 网目目脚张力F_I按式（23）网线受力-变形关系计算：

$$F_\mathrm{T} = C_1 d^2 \varepsilon^{C_2} \quad (23)$$

式中：

F_T—— 网线弹性变形引起的目脚张力，单位为牛顿（N）；

d—— 网线的直径，单位为米（m）；

ε—— 网线的伸长率，$(l - l_0)\ /\ l_0$，l_0是网线的初始长度，单位米（m），l是网线变形之后的长度，单位米（m）；

C_1——网线弹性系数，单位为帕斯卡（Pa）；

C_2——网线材料的指数系数。

6.2.3.3 将网线视作细长圆柱，目脚所受水动力，包括拖曳力和惯性力可按式（24）Morison 公式计算，然后将目脚受到的水动力均匀分配到与之相连的集中质量点。

$$\vec{\boldsymbol{F}}_\mathbf{D} + \vec{\boldsymbol{F}}_\mathbf{I} = \frac{1}{2} C_\mathrm{D}\rho l d|\vec{\boldsymbol{u}}|\vec{\boldsymbol{u}} + C_\mathrm{M}\rho l A\dot{\vec{\boldsymbol{u}}} \quad (24)$$

式中：

$\vec{\boldsymbol{F}}_\mathbf{D}$——拖曳力，单位为牛顿（N）；

$\vec{\boldsymbol{F}}_\mathbf{I}$——惯性力，单位为牛顿（N）；

C_D——拖曳力系数；

C_M——惯性力系数；

ρ—— 流体密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；

l—— 网线（细长圆柱）目脚长度，单位为米（m）；

$\vec{\boldsymbol{u}}$—— 网线（细长圆柱）周围流体的流速矢量，单位为米每秒（m/s）；

A—— 网线（细长圆柱）截面面积，单位为平方米（m²）；

d—— 网线（细长圆柱）的直径，单位为米（m）；

6.2.3.4 计算中为方便网衣模型的建立和网线水动力参数的标准化，宜针对每个集中质量点建立局部坐标系，局部坐标系与整体坐标系的关系如图 8 所示。

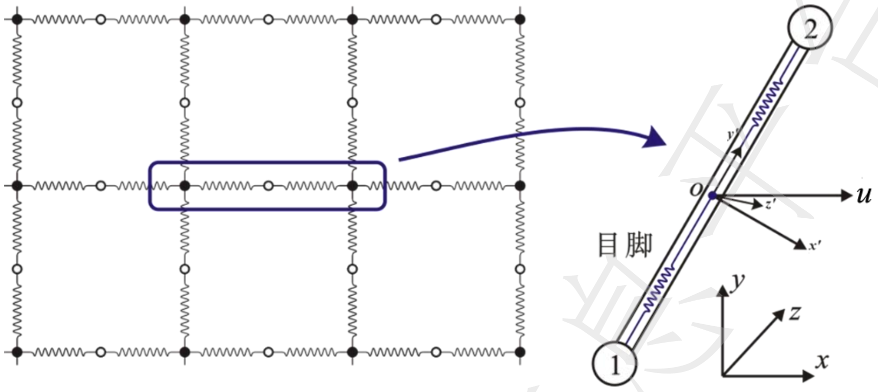


图 8 网衣局部坐标系示意图

6.2.4 纯水流作用下网衣水动力分析

6.2.4.1 纯水流作用下，选择网衣十字单元，如图 3，为数值模型中的受力单元，十字单元的网线和结节视为不同分段的细长圆柱，所受力主要为拖曳力，可采用改进的 Morison 公式计算。单个十字单元所受的拖曳力F_{d}按式（25）计算：

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{d}}=\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{td}}+\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{kd}}=\frac{1}{2}C_{\mathrm{td}}\rho|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}(2a-2Kd)d+\frac{1}{2}C_{\mathrm{kd}}\rho|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}(K^2d)d \quad (25)$$

式中：

$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{d}}$——单个十字单元所受拖曳力，单位牛顿（N）；

$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{td}}$——单个十字单元网线所受拖曳力，单位牛顿（N）；

$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{kd}}$——单个十字单元结节所受拖曳力，单位牛顿（N）；

C_{td}—— 网线（细长圆柱）拖曳力系数；

C_{kd}—— 结节拖曳力系数；

$\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}$——单个十字单元周围流体的流速矢量，单位为米每秒（m/s）；

d —— 网线（细长圆柱）直径，单位为米（m）；

a —— 网目（细长圆柱）长度，单位为米（m）；

K —— 即网衣结节直径与网线直径的比值，无结网时，$K=1$。

6.2.4.2 网衣所受拖曳力F_{D}为组成网衣结构所有的十字单元所受拖曳力之和，按式（26）计算：

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{D}}=\sum\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{d}}=\sum\frac{1}{2}(\varepsilon_{\mathrm{t}}C_{\mathrm{td}}+\varepsilon_{\mathrm{k}}C_{\mathrm{kd}})\rho|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}A_{\mathrm{c}}=\frac{1}{2}C_{\mathrm{D}}\rho|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{d}}A_{\mathrm{p}} \quad (26)$$

式中：

$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{D}}$——网衣所受拖曳力，单位牛顿（N）；

$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{d}}$——单个十字单元拖曳力，单位牛顿（N）；

ε_{t}—— 网线投影面积权重系数，$\varepsilon_{\mathrm{t}}=(2a-2Kd)/(2a-2Kd+K^2d)$；

ε_{k}—— 结节投影面积权重系数，$\varepsilon_{\mathrm{k}}=K^2d/(2a-2Kd+K^2d)$；

A_{c}——网衣十字单元内阻水面积在网衣平面投影，单位为平方米（m²）；

A_{p}——网衣阻水面积在网衣平面投影，单位为平方米（m²）；

C_{D}——网衣拖曳力系数，$C_{\mathrm{D}}=\varepsilon_{\mathrm{t}}C_{\mathrm{td}}+\varepsilon_{\mathrm{k}}C_{\mathrm{kd}}$。

6.2.4.3 水流作用下，网衣拖曳力系数C_{D}主要受网衣密实度S_{n}和雷诺数Re的影响，计算式可按式（27）假定：

$$C_{\mathrm{D}}=g(S_{\mathrm{n}})\cdot f(Re)=g(S_{\mathrm{n}})\cdot[\varepsilon_t f_{\mathrm{t}}(Re)+\varepsilon_{\mathrm{k}}f_{\mathrm{k}}(Re)] \quad (27)$$

式中：

S_{n}——网衣密实度，按式（11）计算；

Re——雷诺数，按式（28）计算；

$g(S_{\mathrm{n}})$ ——拖曳力系数随网衣密实度S_{n}变化的函数；
$f_{\mathrm{t}}(Re)$ ——网线拖曳力系数随雷诺数变化的函数；
$f_{\mathrm{k}}(Re)$——结节拖曳力系数随雷诺数变化的函数。

$$Re=\rho u_d d/\mu \quad (28)$$

式中：
d —— 网线（细长圆柱）直径，单位为米（m）；
μ—— 动力粘性系数，单位牛顿秒每米方（N•s/m²）。

6.2.4.4 函数关系$g(S_{\mathrm{n}})$，$f_{\mathrm{t}}(Re)$和$f_{\mathrm{k}}(Re)$宜根据试验测定。如无试验值，且满足 $177.8<Re<7413.1$，$0.1<S_{\mathrm{n}}<0.7$ 时，网衣拖曳力系数C_{D}可按式（29）～ 式（31）确定：

无结尼龙网：

$$C_{\mathrm{D}}=(\varepsilon_{\mathrm{t}}1.6855Re^{-0.0761}+\varepsilon_{\mathrm{k}}0.2416Re^{0.2023})(6.74S_{\mathrm{n}}^2+0.27S_{\mathrm{n}}+1.71) \quad (29)$$

有结尼龙网：

$$C_{\mathrm{D}}=(\varepsilon_{\mathrm{t}}1.6855Re^{-0.0761}+\varepsilon_{\mathrm{k}}0.2416Re^{0.2023})(6.95S_{\mathrm{n}}^2+0.28S_{\mathrm{n}}+1.76) \quad (30)$$

无结金属网：

$$C_{\mathrm{D}}=(\varepsilon_{\mathrm{t}}1.6855Re^{-0.0761}+\varepsilon_{\mathrm{k}}0.2416Re^{0.2023})(6.42S_{\mathrm{n}}^2+0.20S_{\mathrm{n}}+1.65) \quad (31)$$

式中：
ε_{t}—— 网线投影面积权重系数；
ε_{k}—— 结节投影面积权重系数。

6.2.5 波浪作用下网衣水动力分析

6.2.5.1 在波浪作用下，选择网衣十字单元，如图 3，为数值模型中的受力单元，十字单元的网线和结节视为不同分段的细长圆柱，所受波浪力通常按准静态波浪力考虑，主要包括拖曳力和惯性力，采用积分形式的 Morison 公式计算，再对不同分段细长圆柱所受波浪力进行求和即可得到十字单元的受力。忽略网衣结节所受波浪力，网衣十字单元所受的波浪力，如图 9，按式（32）确定：

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{dw}}=\sum\int_l\left(\frac{1}{2}C_{\mathrm{dw}}\rho d|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{w}}|\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{w}}+C_{\mathrm{mw}}\rho A\dot{\vec{\boldsymbol{u}}}_{\mathrm{w}}\right)dl \quad (32)$$

$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{dw}}$—— 网衣十字单元所受波浪力，单位牛顿（N）；
$\vec{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{w}}$—— 网线（细长圆柱）周围波浪水质点速度矢量，单位为米每秒（m/s）；
A——网线（细长圆柱）截面面积，单位为平方米（m²）；
ρ—— 流体密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
l——网线（细长圆柱）长度，单位为米（m）；
d——网线（细长圆柱）直径，单位为米（m）。
C_{dw}——波浪作用下，网线（细长圆柱）拖曳力系数；
C_{mw}——波浪作用下，网线（细长圆柱）惯性力系数；

6.2.5.2 网衣所受的波浪力F_{Dw}为组成网衣所有十字单元所受波浪力之和，按式（33）计算：

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{Dw}}=\sum_{i=1}^{N}\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{dw}i} \quad (33)$$

式中：
$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{Dw}}$—— 网衣所受波浪力，单位牛顿（N）；
$\vec{\boldsymbol{F}}_{\mathbf{dw}i}$—— 第$i$个十字单元所受波浪力，单位牛顿（N）；
N——组成网衣的十字单元个数。

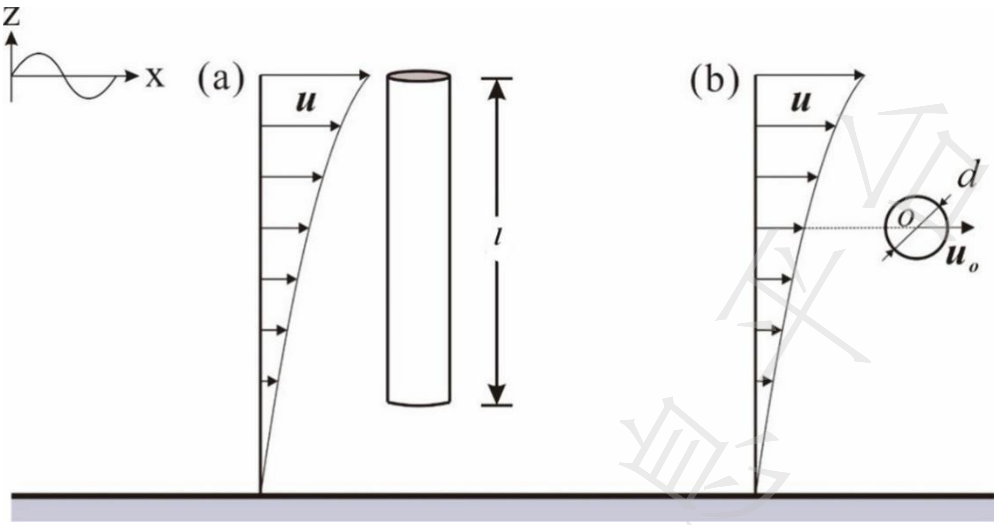


图 9 规则波作用下垂直圆柱和水平圆柱周围流速

6.2.5.3 波浪作用下，拖曳力系数C_{dw}和惯性力系数C_{mw}与波浪的KC数和网衣的密实度S_{n}相关，宜依据试验测定。KC数按式（34）确定：

$$KC = U_{max}T/d \quad (34)$$

式中：
U_{max}——波面以下最大水平水质点速度，单位米每秒（m/s）；
T——波周期，单位秒（s）；
d——网线（细长圆柱）直径，单位米（m）。

6.2.5.4 如无试验值，且满足 $0 < KC < 100$，$0.1 < S_{\mathrm{n}} < 0.7$ 时，拖曳力系数C_{dw}和惯性力系数C_{mw}可按式（35）~式（38）确定：

金属网结构的拖曳力系数：

$$C_{\mathrm{dw}} = 3.2^{2.5d/l}[1 + 10/(S_{\mathrm{n}} + KC/3)^{1.5}] \quad (35)$$

金属网的惯性力系数：

$$C_{\mathrm{mw}} = (0.67 + S_{\mathrm{n}})KC^{0.29+d/2l} \quad (36)$$

尼龙网的拖曳力系数：

$$C_{\mathrm{dw}} = 2.7^{2.5d/l}[1.3 + 13/(S_{\mathrm{n}} + KC/3)^{1.5}] \quad (37)$$

尼龙网的惯性力系数：

$$C_{mw} = (0.67 + S_{\mathrm{n}})KC^{0.29+d/2l} \quad (38)$$

6.2.6 **网目群化**

在网目群化过程中，等效模型网的密实度和投影面积应与原型网相同。网目群化后网衣受力修正系数f_c按式（39）确定：

$$f_{\mathrm{c}} = \frac{C_{\mathrm{dp}}}{C_{\mathrm{dg}}} = [1 - \frac{1 - {R_{\mathrm{g}}}^{-0.278}}{7\left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{t}}}{\varepsilon_{\mathrm{k}}}\right){Re_{\mathrm{g}}}^{-0.278} + 1}]{R_{\mathrm{g}}}^{0.0761} \quad (39)$$

f_c—— 网目群化后网衣受力修正系数；
C_{dp}—— 原型网拖曳力系数；

C_{dg}—— 模型网拖曳力系数；

Re_{g}—— 等效模型网雷诺数，按式（28）计算，网线直径d选择模型网网线直径。

6.2.7 根据研究目标所处水域的水动力特征和技术要求，动力条件选择纯流作用，波浪作用和波流共同作用。对于波流共同作用条件，波浪要素计算应符合 JTS 145—2015 中 8.3 的相关规定。

6.2.8 网目群化比宜小于 10。

6.2.9 集中质量点的运动控制方程可采用 Runge-Kutta 法求解。

6.2.10 柔性网具结构动力响应数值模拟应给出初始位置、环境荷载等初始条件和边界条件。

6.3 模拟验证

6.3.1 验证工作宜包括率定和验证计算，模型的相关参数应通过率定确定，并符合下列规定：

注：引用 JTS/T 231—2021，11.7.1。

a）验证阶段应按率定阶段确定的模拟参数进行计算，当验证结果不满足要求时应重新率定。

注：引用 JTS/T 231—2021，11.7.1.1。

b）率定和验证应采用不同的水流、波浪条件进行。

6.3.2 柔性网具结构动力响应数值模拟验证计算的内容应包含各位置系泊绳索最大张力，挂网墩（桩）台所受总力最大值、受力分布和网衣运动姿态等。

6.3.3 各位置系泊绳索最大张力和挂网墩（桩）台所受总力最大值允许偏差+8%，挂网墩（桩）台受力分布允许偏差+15%，网衣运动姿态应与现场网衣运动姿态接近。

6.4 方案模拟计算及成果分析

6.4.1 方案模拟计算中所采用的参数应与相关验证计算结果相同。

注：引用 JTS/T 231—2021，11.8.1。

6.4.2 方案模拟计算应按验证确定的模拟计算模式进行，其初始条件和边界条件应根据方案要求确定。

6.4.3 方案计算和分析应包含各位置系泊绳索最大张力，挂网墩（桩）台所受总力最大值、受力分布和网衣运动姿态等，还应符合 JTS/T 231—2021 中 5.5.10，5.5.11 和 5.5.12 的相关规定。

6.4.4 重要工程的数值模拟计算成果宜提供可视化动态显示。

参　考　文　献

[1] GB/T　40749—2021 海水重力式网箱设计技术规范
[2] JTS　145—2015 港口与航道水文规范
[3] JTS/T　231—2021 水运工程模拟试验技术规范
[4] SC/T　4011—1995 拖网模型水池试验方法
[5] SC/T　4014—1997 拖网模型制作方法