

ICS 19.020

CCS P20

# 团 体 标 准

T/CIN XXX —2024

## 海岸工程柔性结构模拟试验 技术规范

Regulations specification for modeling technique of coastal  
flexible structures

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

202X-XX--XX 发布

202X-XX--XX 实施

中国航海学会 发布

## 目 次

前言 .....	II
1 总则 .....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 柔性结构水动力响应物理模拟试验.....	2
5 柔性结构水动力响应数学模型试验.....	10
参考文献.....	16

## 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（CIN）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、袁春光、崔成、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

# 海岸工程柔性结构模拟试验技术规范

## 1 范围

本文件规定了开展含有网衣海岸工程柔性结构水动力响应时的试验模拟技术,包括物理模型试验中的基础资料、模型设计、模型制作、试验测量和数学模型试验中的数值方法、数学分析以及网目群化等内容。

本文件适用于潮汐河口、海岸及近海工程柔性结构涉及的水动力响应模拟试验。

## 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 拖网模型水池方法

## 3 术语和定义

### 3.1

**柔性结构 flexible structure**

由网具、系泊绳索、锚泊构件组成的系统,见图1所示。

### 3.2

**网衣 net**

由柔性丝线按照一定编织工艺加工得到的透水材料(由网线编织成的一定尺寸网目结构的片状编织物),特征参数包括网目长度、网线直径(丝径)、缩结系数等。

### 3.3

**网纲 rope**

网具的骨架结构,通常由较粗的绳索构成,用于保持网具的基本形态。

### 3.4

**网具 netting structure**

由网衣、网纲构成的网状结构。

## 3.5

系泊绳索 mooring line

用于固定网具位置的缆绳。

## 3.6

锚泊构件 mooring facility

由墩台（桩台）、锚环、锚碇块、浮球（筒）等组成，用于固定网具位置的设施结构。

## 3.7

网目群化 mesh grouping

一种采用等效模型网衣替代原型网的方法，通过将原型网的网线直径和网目尺寸同比例放大，从而成倍降低等效模型网中的网目数量。

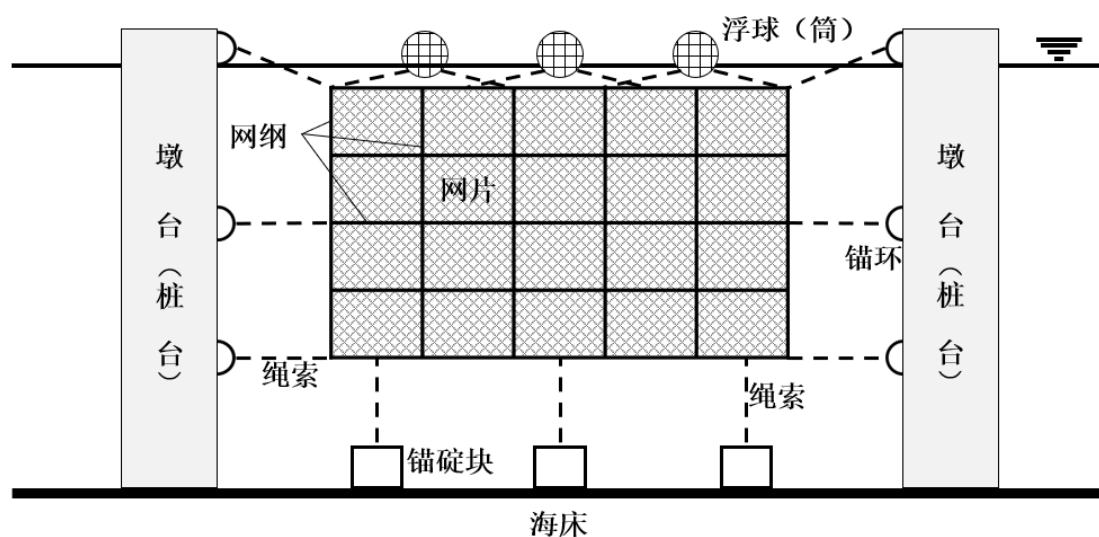


图1 典型柔性结构示意图

## 4 柔性结构水动力响应物理模拟试验

## 4.1 基本资料

柔性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 中要求的地形、水文、结构工程设计方案等资料外，还应涵盖柔性网具结构、系泊绳索、锚泊构件等的规格、材质，以及网具堵塞类型、程度等资料。

## 4.2 模型设计

## 4.2.1 基本比尺关系

4.2.1.1 柔性结构水动力响应模拟试验中的整体结构和水动力条件的模型设计，应满足几何相似、重力相似条件和其他相关比尺的要求，其比尺按以下关系确定。

## 4.2.1.2 几何相似

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

式中：

$\lambda_l$ ——整体几何比尺，计算如式（1）；

$l_p$ ——原型整体几何尺度；

$l_m$ ——模型整体几何尺度。

#### 4.2.1.3 重力相似

$$\lambda_v = \lambda_l^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\lambda_v$ ——速度比尺，计算如式（2）。

#### 4.2.1.4 其他相关比尺

$$\lambda_t = \lambda_T = \lambda_l^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda_F = \lambda_l^3 \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda_f = \lambda_l^{-1/2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\lambda_p = \lambda_l \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$\lambda_t$ ——时间比尺，计算如式（3）；

$\lambda_T$ ——波周期比尺，计算如式（3）；

$\lambda_F$ ——力比尺，计算如式（4）；

$\lambda_f$ ——频率比尺，计算如式（5）；

$\lambda_p$ ——压强比尺，计算如式（6）；

$\lambda_Q$ ——流量比尺，计算如式（7）。

#### 4.2.2 网具相似模拟

##### 4.2.2.1 网衣比尺

当无法保证网具模型的网目长度、网线和网纲直径的比尺与整体结构比尺一致，网具模型的制作难度很大时，可采用变比尺模型模拟网具，即网具的网目长度、网线和网纲直径采用网衣比尺 $\lambda_l'$ ，满足式（8）所示关系：

$$\lambda_l' = a_p/a_m = d_p/d_m = \delta_p/\delta_m \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$\lambda_l'$ ——网衣比尺；

$a_m$ ——模型网目长度；

$d_m$ ——模型网线直径；

$\delta_m$ ——模型网纲直径；

- $a_p$ —— 原型网目长度；
- $d_p$ —— 原型网线直径；
- $\delta_p$ —— 原型网纲直径。

4.2.2.2 网衣密实度相似模拟

网衣满足密实度相似，密实度比尺应满足式（9）所示关系：

$$\lambda_S = S_p/S_m = 1 \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- $\lambda_S$ —— 网衣密实度比尺；
- $S_p$ —— 原型网衣密实度。
- $S_m$ —— 模型网衣密实度。

网衣密实度计算可采用十字单元法（如图2所示），计算方法如式（10）、（11）所示：

$$A_C = (2a - 2K \cdot d) \cdot d + (K \cdot d)^2 = (2a - 2K \cdot d + K^2 \cdot d) \cdot d \dots\dots\dots (10)$$

$$S = \frac{A_C}{a^2} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- $d$ —— 网线直径（m）；
- $a$ —— 网目长度（m）；
- $K$ —— 网衣缩结系数，即网衣结节直径与网线直径的比值，无结网  $K=1$ ；
- $S$ —— 网衣密实度。

当模型网衣与原型网衣具有相同的缩结系数  $K$  时，满足式（12）、（13）的比例关系（如图3所示）：

$$a_p/a_m = d_p/d_m \dots\dots\dots (12)$$

$$d_p/a_p = d_m/a_m \dots\dots\dots (13)$$

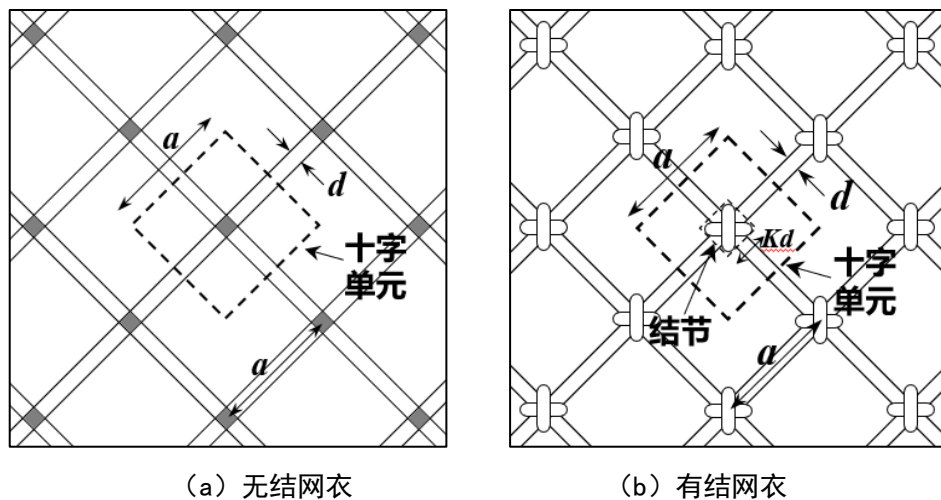


图2 网衣十字单元示意图

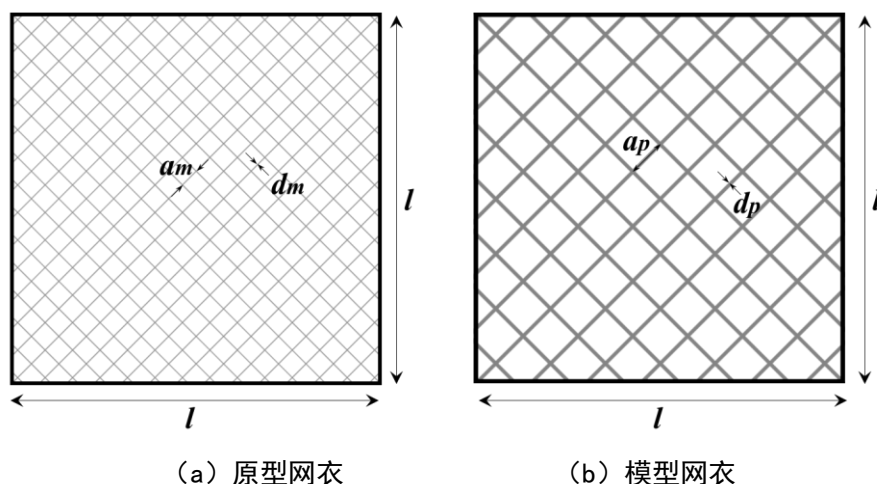


图3 网衣密度相似示意图

#### 4.2.2.3 网具浮重比相似

网具应满足浮重比相似，浮重比比尺应满足式（14）关系：

$$\lambda_{FG} = r_p/r_m = 1 \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$\lambda_{FG}$ —— 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；

$F_{bm}$ —— 模型网具浮力；

$G_p$ —— 原型网具重力；

$G_m$ —— 模型网具重力。

#### 4.2.3 系泊绳索相似模拟

4.2.3.1 系泊绳索除满足几何相似外，还应满足质量和弹性相似。

##### 4.2.3.2 系泊绳索质量相似

绳索单位长度质量比尺满足式（15）、（16）关系：

$$\lambda_w = \lambda_l^2 \dots\dots\dots (15)$$

$$\lambda_w = \frac{W_p}{W_m} = \frac{\rho_p \cdot \pi (d_p / 2)^2}{\rho_m \cdot \pi (d_m / 2)^2} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$\lambda_w$ —— 绳索单位长度质量比尺；

$W_p$ —— 原型绳索单位长度质量；

$W_m$ —— 模型绳索单位长度质量；



$\rho_p$ ——原型绳索材质密度；

$\rho_m$ ——模型绳索材质密度；

$d_{lp}$ ——原型绳索直径；

$d_{lm}$ ——模型绳索直径。

#### 4.2.3.3 系泊绳索弹性相似

系泊绳索抗拉刚度比尺满足式（17）、式（18）关系：

$$\lambda_{EA} = \frac{(EA)_p}{(EA)_m} = \lambda_l^3 \dots\dots\dots (17)$$

$$EA = E\pi d_l^2 / 4 \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$\lambda_{EA}$ ——绳索抗拉刚度比尺；

$(EA)_p$ ——原型绳索抗拉刚度；

$(EA)_m$ ——模型绳索抗拉刚度；

$E$ ——有效弹性模量。

#### 4.2.4 锚泊构件相似模拟

对于桩(墩)台、锚碇块、浮球(筒)等锚泊构件的模型设计，应符合 4.2.2 款的规定，还应满足墩台、锚碇块、浮球(筒)重心相似和浮球(筒)浮心相似的要求。

#### 4.2.5 网具堵塞相似模拟

##### 4.2.5.1 堵塞相似

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，堵塞物分布情况主要分为漂浮型、悬浮型、网线自生长型 3 种。条件允许时，宜选原型实物对堵塞物进行模拟，并保证堵塞物分布和堵塞程度（或堵塞率）与原型保持一致，堵塞物的质量与原型相似，满足式（19）中比例关系：

$$\lambda_{WB} = WB_p / WB_m = \lambda_l^3 EA = E\pi d_l^2 / 4 \dots\dots\dots (19)$$

式中：

$\lambda_{WB}$ ——堵塞物质量比尺；

$WB_p$ ——原型堵塞物质量，单位千克（kg）；

$WB_m$ ——模型堵塞物质量，单位为千克（kg）。

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。

##### 4.2.5.2 平面型网具堵塞模拟

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平展状

态过水断面面积的比值，如图 4 所示，具体计算公式如式 (20)。

$$k_d = \frac{S_b}{S_c} \times 100\% \quad EA = E\pi d_l^2 / 4 \dots\dots\dots (20)$$

式中：

$k_d$ ——平面型网具堵塞率；

$S_b$ ——堵塞面积，单位为平方米 ( $\text{m}^2$ )；

$S_c$ ——网具过水断面面积，单位为平方米 ( $\text{m}^2$ )。

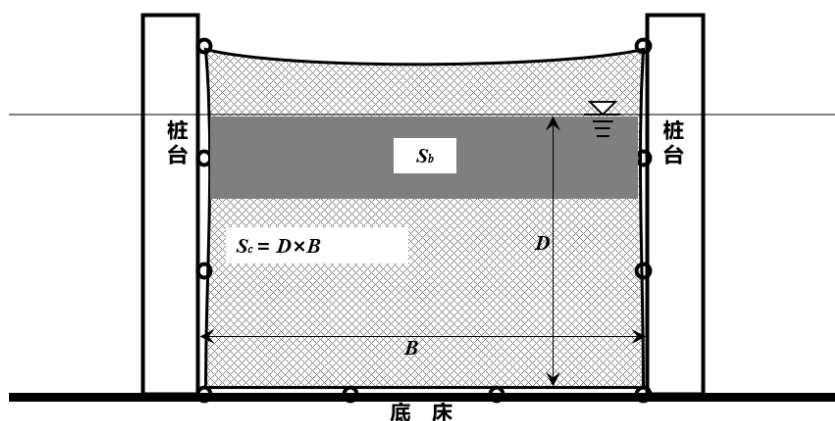
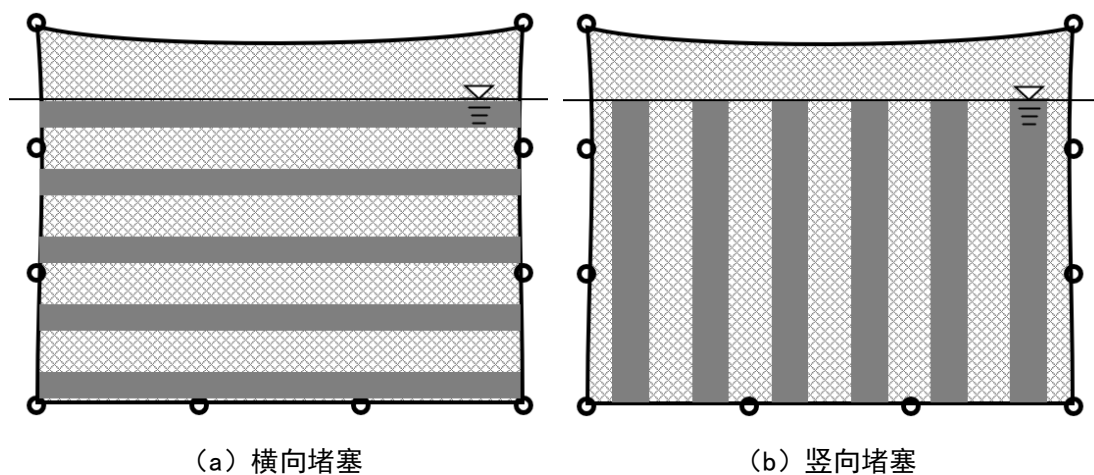


图 4 平面型网具堵塞示意图

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。

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）。



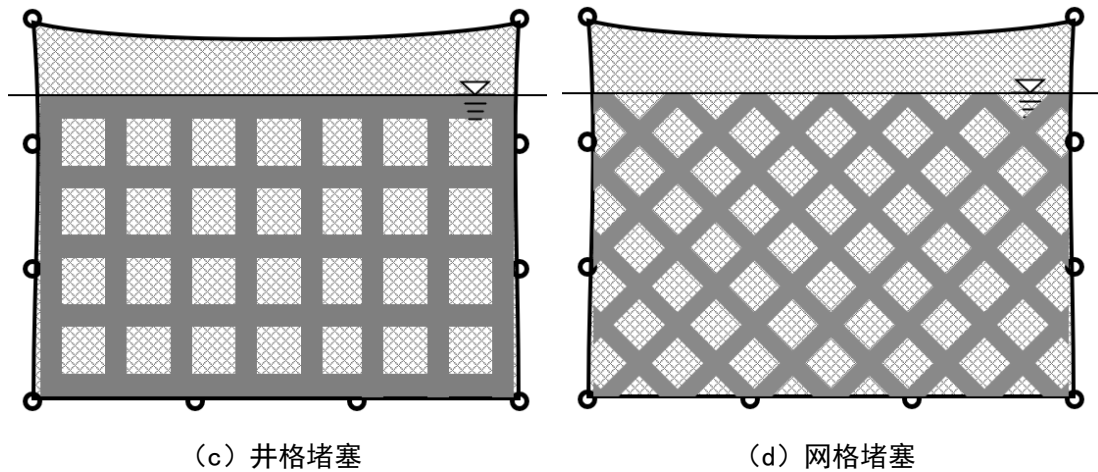


图5 平面型网具均匀封堵方式示意图

4.2.5.3 网兜型网具堵塞模拟

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（如图6所示），计算公式如式（21），网兜堵塞方向为自兜尾向网兜开口方向。

$$k_l = \frac{l_b}{l_n} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

$k_l$ ——网兜型网具堵塞率（统一描述为堵塞率）；

$l_b$ ——堵塞长度，单位为米（m）；

$l_n$ ——网具总长度，单位为米（m）。

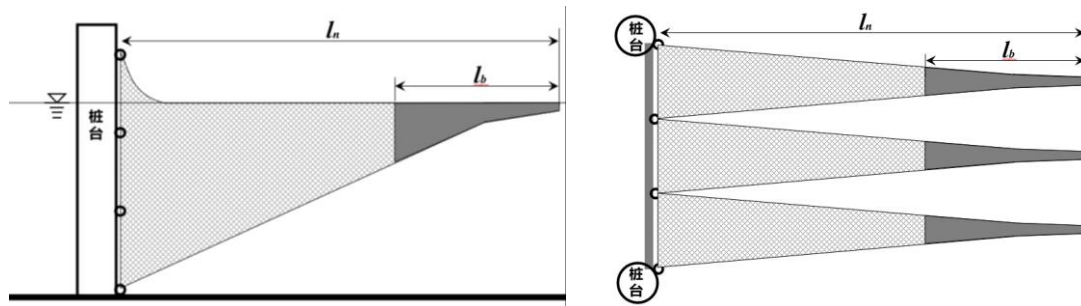


图6 网兜型网具堵塞程度

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，并应满足堵塞物质量相似要求。

4.2.6 试验类型选择

4.2.6.1 柔性结构水动力响应物理模型实验可分为整体模型试验、局部模型试验；

4.2.6.2 模型试验设计为以下条件时，宜采用整体模型试验：

挂网桩（墩）台两侧网具结构形式及动力条件差异较大。

#### 4.2.6.3 模型试验设计为以下条件时，宜采用局部模型试验：

挂网桩（墩）台两侧网具结构形式及动力条件差异较小。

#### 4.2.7 模型比尺选取

4.2.7.1 模型比尺选择应根据试验水池或水槽和结构物的尺度、波浪、水流等动力因素和试验仪器测量精度确定，并应充分利用试验条件，采用较小的模型比尺。

4.2.7.2 整体模型试验中，试验整体几何比尺 $\lambda_l$ 不宜超过 50。

4.2.7.3 局部模型试验中，试验整体几何比尺 $\lambda_l$ 不宜超过 20。

4.2.7.4 整体几何比尺与网衣比尺的比值（ $\lambda_l/\lambda_l'$ ）不宜大于 10。

#### 4.2.8 模型范围选取

4.2.8.1 整体模型试验宜在水池中进行，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。

4.2.8.2 局部模型试验宜在水槽中进行，模型范围应包括至少一组完整的试验要求研究的柔性结构系统，尽可能避免水槽边界对动力环境的影响。

#### 4.2.9 水动力条件模拟

根据研究目标所处水域的水动力特征，可选取单独水流作用、单独波浪作用或波浪和水流联合作用作为试验水动力条件，水动力条件的模拟应满足 JTS/T 231—2021 的规定。

#### 4.3 模型制作

4.3.1 模型网具宜选取与原型网具相同的材质；

4.3.2 模型网具应保证与原型网具具有相同的装配工艺；

4.3.3 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。

4.3.4 模型中的锚环应保证在试验中不发生位移。

#### 4.4 试验测量

4.4.1 试验中宜同步测量柔性结构系统上游和下游的水位和流速，系泊绳索拉力以及桩(墩)台受力。

4.4.2 根据试验需求，宜采用高速摄像机测量柔性结构的运动过程。

4.4.3 应尽量减小绳索拉力传感器自重对拉力测量结果的影响。

4.4.4 挂网桩(墩)台的受力宜采用测量总力的方式。

4.4.5 测量运动量高速摄像机的帧数频率不小于 50Hz。

4.4.6 试验中水面高度、水流的采样频率不小于 50Hz。

4.4.7 试验中绳索张力、桩(墩)台总力的采样频率不小于 100Hz。

4.4.8 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。

4.4.9 每组试验应至少重复 3 次，取其平均值作为代表值。

#### 4.5 其他说明

4.5.1 当整体几何比尺与网衣比尺采用不同值时，网具受力存在一定比尺效应。条件允许时，宜采用不少于 3 组比尺的系列比尺试验开展研究，系列试验中的各比尺应保证有足够大的差异。

4.5.2 条件允许时，直接开展 1:1 原型尺度试验。

### 5 柔性结构水动力响应数学模型试验

#### 5.1 数值模拟方法

5.1.1 柔性网具运动与受力数值模拟宜采用集中质量法，可适应柔性网具大变形特性，又可兼顾计算效率。若需计算柔性网具周围流场，可采用集中质量法与多孔介质模型相结合的方法进行计算。以下介绍集中质量法。

##### 5.1.2 网片模型建立

对于柔性网具主体的网片结构，通过将网片、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)，集中质量点之间采用无质量的弹簧进行连接，得到理想化的网片模型，如图 7 所示。

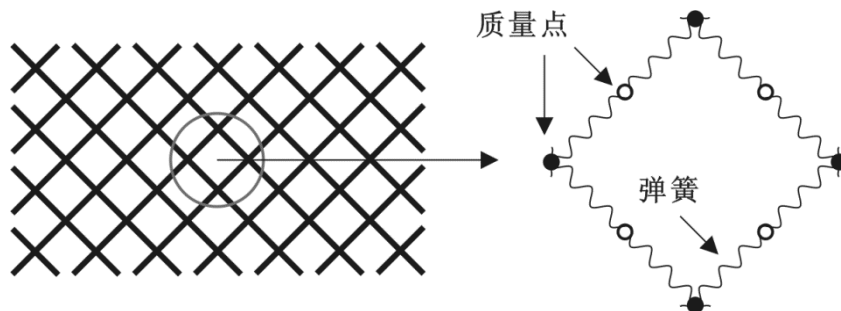


图 7 网衣集中质量点模型

##### 5.1.3 网片动力学控制方程

对于网片集中质量点，其动力学微分方程，计算如式 (22)：

$$M\ddot{X} = M \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = F_T + F_D + F_I + F_B + G \dots \dots \dots (22)$$

式中：

$M$ —— 质量点质量；

$X$ —— 质量点位移；

$F_T$ —— 作用于质量点的网目目脚张力；

$F_D$ —— 作用于质量点的拖曳力；

$F_I$ —— 作用于质量点的惯性力；

$F_B$ —— 作用于质量点的网片浮力；

$G$ —— 作用于质量点的网片重力。

### 5.1.4 网片受力分析

对于柔性网具中网片的受力，主要包括网线弹性变形引起的目脚张力  $F_T$  和网片所受水动力  $F_D$ 、 $F_I$ 。

网目目脚张力  $F_T$  的计算应满足网线受力-变形关系，， 计算如式 (23)：

$$F_T = C_1 d^2 \varepsilon^{C_2} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

$d$ —— 网线的直径；

$\varepsilon$ —— 网线的伸长率，计算式为  $(l - l_0) / l_0$ ， $l_0$  是网线的初始长度， $l$  是网线变形之后的长度；

$C_1, C_2$ —— 材料的弹性常数；

网片所受水动力的计算，将网线视作细长圆柱体，采用 Morison 公式对网片的拖曳力和惯性力进行计算，计算如式 (24)。

$$F_D + F_I = \frac{1}{2} C_D \rho d l |\bar{u}| \bar{u} + C_M \rho A l \dot{\bar{u}} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

$C_D$ —— 网片的拖曳力系数；

$C_M$ —— 网片的惯性力系数；

$\rho$ —— 流体密度；

$l$ —— 网线长度；

$\bar{u}$ —— 网线周围流体的流速；

$A$ —— 网线（圆柱体）截面面积；

计算中为方便网片模型的建立和网线水动力参数的标准化，宜针对每个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。

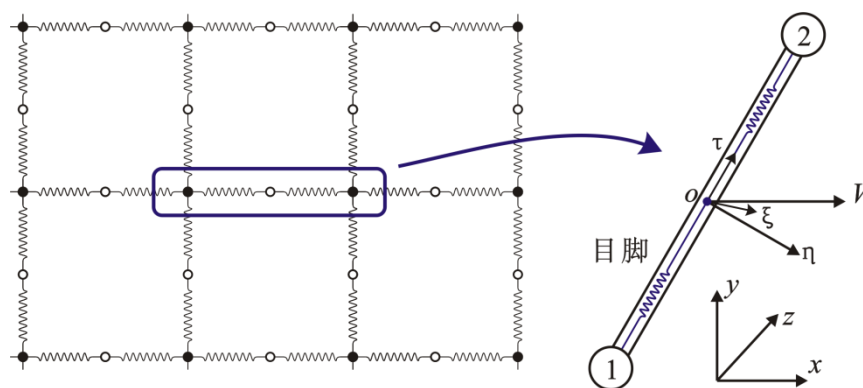


图 8 网片局部坐标系示意

## 5.2 水流作用下网衣水动力分析

5.2.1 水流作用下，网片水动力分析宜采用改进的 Morison 公式计算网片的水流力。

### 5.2.2 水动力系数关系

单纯水流中网片结构主要受拖曳力  $F_D$ 。计算中受力单元选择网片十字单元（如图 2），单个十字单元的拖曳力  $F_d$  计算公式如式（25）所示：

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho u^2 A_p \dots\dots\dots (25)$$

$A_p$ ——网片十字单元结构水下投影面积。

十字单元所受拖曳力  $F_d$  包括网线受力  $F_{td}$  和结节受力  $F_{kd}$ ，计算公式如式（26）：

$$F_d = F_{td} + F_{kd};$$

$$\text{式中, } \begin{cases} F_{td} = \frac{1}{2} C_{td} \rho u^2 (2a - 2Kd)d \dots\dots\dots (26) \\ F_{kd} = \frac{1}{2} C_{kd} \rho u^2 (K^2 d)d \end{cases}$$

$C_{td}$ ——网线拖曳力系数；

$C_{kd}$ ——结节拖曳力系数。

网片所受拖曳力  $F_D$  可通过组成网结构的十字单元的拖曳力之和求得，计算如式（27）：

$$F_D = \sum F_d = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 A = \frac{1}{2} (\varepsilon_t C_{td} + \varepsilon_k C_{kd}) \rho u^2 A;$$

$$\text{式中, } \begin{cases} C_D = \varepsilon_t C_{td} + \varepsilon_k C_{kd} \dots\dots\dots (27) \\ \varepsilon_t = \frac{2a - 2Kd}{2a - 2Kd + K^2 d} \\ \varepsilon_k = \frac{K^2 d}{2a - 2Kd + K^2 d} \end{cases}$$

$\varepsilon_t$ ——网线投影面积权重系数；

$\varepsilon_k$ ——结节投影面积权重系数。

### 5.2.3 水动力影响因素

拖曳力系数  $C_D$  主要受网片密度  $S_n$  和雷诺数  $Re$  的影响，计算如式（28）：

$$C_D = f(S_n) \cdot f(Re) \dots\dots\dots (28)$$

$$= f(S_n) \cdot [\varepsilon_t f_t(Re) + \varepsilon_k f_k(Re)]$$

以上参数关系  $f(S_n)$ 、 $f_t(Re)$ 、 $f_k(Re)$  一般应依据网片水流试验测定获取。如无试验数据，对于  $10^{2.25} < Re < 10^{3.87}$  雷诺数范围内的网片拖曳力系数估算可参考以下公式：

无结尼龙网，计算如式（29）：

$$C_D = (\varepsilon_t 1.6855 Re^{-0.0761} + \varepsilon_k 0.2416 Re^{0.2023}) (6.74 S_n^2 + 0.27 S_n + 1.71) \dots\dots\dots (29)$$

有结尼龙网，计算如式 (30)：

$$C_D = (\varepsilon_t 1.6855 Re^{-0.0761} + \varepsilon_k 0.2416 Re^{0.2023})(6.95 Sn^2 + 0.28 Sn + 1.76) \dots\dots (30)$$

无结金属网，计算如式 (31)：

$$C_D = (\varepsilon_t 1.6855 Re^{-0.0761} + \varepsilon_k 0.2416 Re^{0.2023})(6.42 Sn^2 + 0.20 Sn + 1.65) \dots\dots (31)$$

式中：

$$\varepsilon_t = \frac{2a - 2Kd}{2a - 2Kd + K^2d}; \quad \varepsilon_k = \frac{K^2d}{2a - 2Kd + K^2d} \dots\dots (32)$$

### 5.3 波浪作用下网衣水动力分析

5.3.1 波浪作用下网片模型的计算单元仍采用十字单元，网片拖曳力和惯性力宜采用改进的 Morison 公式计算。

#### 5.3.2 波浪力计算方法

网片十字单元所受波浪力，通常采用准静态波浪力，网线和结节视为不同分段的细长圆柱，通过 Morison 公式计算得到不同分段的拖曳力和惯性力，再进行求和即可得到十字单元受力，细长圆柱（如图 9）的波浪力计算如式 (33)：

$$F_{cyl} = \int_l (0.5 \rho C_D d |U|U + \rho C_M A_{cyl} \dot{U}) dz \dots\dots (33)$$

$U$ —— 圆柱周围流体的流速矢量；

$A_{cyl}$ —— 圆柱截面面积；

$\rho$ —— 流体密度；

$l$ —— 圆柱长度；

$d$ —— 圆柱直径。

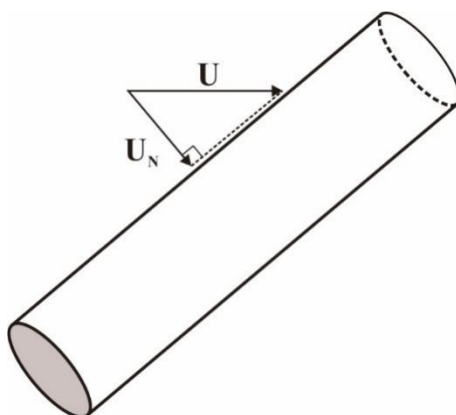


图 9 有冲角的圆柱单元上的流速分量

网片十字单元所受的波浪力  $F_n$  为单元内所有水平圆柱和垂直圆柱所受波浪力之和（如



图 10 所示), 计算如式 (34)。其中, 网片周围流场的水质点流速依据波要素进行计算, 垂向圆柱周围速度通过  $U = (\int_l u dz)/l$  计算; 水平圆柱周围速度取水平圆柱中心点流速  $u_0$ ; 网片结节对波浪力的影响可忽略不计。

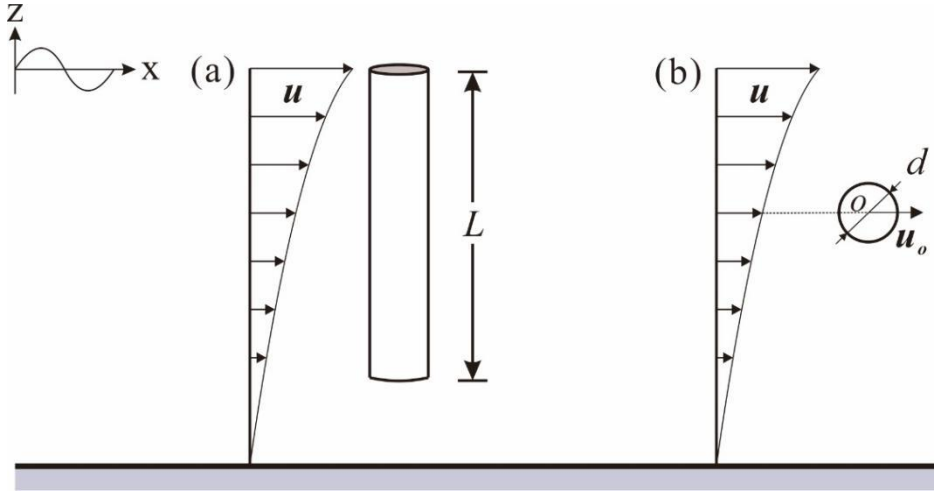


图 10 规则波下垂直圆柱和水平圆柱周围流速

$$F_n = F_{hc} + F_{vc} \dots\dots\dots (34)$$

$$F_{hc} = \sum (0.5\rho C_D d l_h |u_0^n| u_0^n + \rho C_M A_{cyl} l_h \dot{u}_0^n) \dots\dots\dots (35)$$

$$F_{vc} = \int_{l_v} (0.5\rho C_D d |U| u + \rho C_M A_{cyl} \dot{u}) dz \dots\dots\dots (36)$$

$F_{hc}, F_{vc}$ —— 水平圆柱单元受力和垂直圆柱单元受力, 计算公式如 (35)、(36) 所示;

$l_h, l_v$ —— 波面下的水平、垂直圆柱单元长度;

### 5.3.3 波浪作用下水动力系数

波浪作用下, 网片的拖曳力系数  $C_D$ 、惯性力系数  $C_M$  与波浪的  $KC$  数及网片的密实度  $S_n$  相关, 其取值主要依据相关试验结果得到。在无试验数据参考时, 也可参照以下公式选取, 金属网结构的拖曳力系数, 计算如式 (37) 所示:

$$C_D = 3.2^{2.5d/l} (1 + 10/(S_n + \frac{KC}{3})^{1.5}) \dots\dots\dots (37)$$

金属网的惯性力系数, 计算如式 (38) 所示:

$$C_M = (0.67 + S_n) KC^{0.29+d/2l} \dots\dots\dots (38)$$

尼龙网的拖曳力系数, 计算如式 (39) 所示:

$$C_D = 2.7^{2.5d/l} (1.3 + 13/(S_n + \frac{KC}{3})^{1.5}) \dots\dots\dots (39)$$

### 5.4 网目群化

网目群化是一种采用等效模型网片替代原型网的方法。通过将原型网的网线直径和网目尺寸同比例放大，从而成倍降低等效模型网中的网目数量，原型网与模型网之间的网目数量比值定义为群化比。

在网目群化过程中，采取保持等效模型网的密实度和投影面积与原型网结构相同。网片群化修正系数 $f_c$ 可按如式（40）计算得到：

$$f_c = \frac{C_{dp}}{C_{dg}} = \left(1 - \frac{1 - R_g^{-0.278}}{7(\varepsilon_t/\varepsilon_k)Re_g^{-0.278} + 1}\right) R_g^{0.0761} \dots\dots\dots (40)$$

$f_c$ —— 网目群化后网片受力修正系数；

$C_{dp}$ —— 原型网拖曳力系数；

$C_{dg}$ —— 模型网拖曳力系数；

$Re_g$ —— 等效模型网结构的雷诺数，参考的是模型网结构的网线直径。

参 考 文 献

- [1] JTS/T 231—2021 水运工程模拟试验技术规范
- [2] SC/T 4011—1995 拖网模型水池方法
- [3] 解鸣晓, 阳志文, 黄玉新. 滨海拦污设施水动力响应试验研究 [M]. 天津科技出版社, 2020.12. 刊号: ISBN 978-7-5576-8778-6
- [4] 沐雨, 解鸣晓, 王辉, 诸裕良, 罗岁丰, 祝奇超, 袁春光, 孙振祥. 波流联合作用下平面拦污网衣系泊动力响应特性研究 [J]. 水道港口, 2022, 43(4), 421-429.
- [5] 许条建. 离岸组合式网箱水动力特征研究 [D]. 大连理工大学, 2014.
- [6] 唐鸣夫. 波流作用下网结构水动力特性研究 [D]. 大连理工大学, 2020.