

# 渔业养殖平台网衣水动力载荷系数计算方法研究

付志国, 丁果林, 段晶辉, 姚云鹏, 王 琳

中国船级社海洋工程技术中心, 天津 300457

**摘要:** 网衣所承受的水动力载荷对渔业养殖平台的受力及运动有显著影响。为确定不同材质与结构形式网衣所承受的水动力载荷, 通过研究网衣的结构和材质特性, 建立了纤维网衣和金属网衣水动力载荷系数计算方法。针对纤维网衣, 提出了适用于不同网孔形状的网衣密实度计算公式; 针对金属网衣, 提出了一个等效计算公式, 适用于多种网孔形状的网衣水动力载荷系数计算, 并探讨了网孔形状对网衣水动力载荷系数的影响。计算结果表明, 当网目边长相同时, 无结纤维网衣中六边形网衣的水动力载荷系数最低, 而金属网衣中矩形焊接网衣的水动力载荷系数最低。研究结果可为海上渔业养殖平台的网衣选型和水动力载荷计算提供参考。

**关键词:** 网衣; 水动力载荷; 网衣密实度; 渔业养殖平台

中图分类号: S 967.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Calculation method of hydrodynamic load factors for aquaculture platform netting

FU Zhiguo, DING Guolin, DUAN Jinghui, YAO Yunpeng, WANG Lin

Offshore Engineering Technology Center of China Classification Society, Tianjin 300457, China

**Abstract:** The hydrodynamic load on netting has a significant impact on the force and motion of aquaculture platform. To determine the hydrodynamic load on netting of different materials and structural forms, by studying the structural and material characteristics of netting, we designed the standardized calculation methods for the hydrodynamic load factors on fiber netting and metal netting. For fiber netting, we set a formula for calculating the solidity of netting applicable to different mesh shapes. For metal netting, we set a formula for calculating the hydrodynamic load factors equivalent of netting applicable to different mesh shapes. Besides, we analyzed the impact of mesh shape on the hydrodynamic load factors of netting. The calculation results show that when the mesh edge length was the same, for knotless fiber netting, the hexagonal netting experienced the least hydrodynamic load factors. For metal netting, the rectangular welded netting experienced the least hydrodynamic load factors. The findings provide a reference for the selection of netting types and hydrodynamic load calculations for fishery platform.

**Keywords:** Netting; Hydrodynamic load; Netting solidity; Aquaculture platform

近年来, 中国在海上渔业养殖领域已取得长足进步, 多座海上渔业养殖平台陆续建成并投入使用。网衣是这些渔业养殖平台的重要组成部分, 其承受的水动力载荷对平台的运动特性、稳定性以及结构强度影响显著<sup>[1]</sup>。因此, 深入理解网衣的水动力特性是优化渔业养殖平台设计的关键<sup>[2]</sup>。

网衣是由金属或高分子材料按设计形状制作而成的多孔网状结构物。按网孔形状可将其分为矩形网衣、菱形网衣和六边形网衣等; 按材质可分为纤维网衣[包括尼龙(PA)网衣、聚乙烯(PE)网衣、超高分子量聚乙烯网衣(UHMWPE)等]、金属网衣和聚酯纤维(PET)网衣等<sup>[3-4]</sup>; 按结构形式可分为

收稿日期: 2024-12-01; 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 海上新能源装备技术研究与规范标准编制(2023-15)

作者简介: 付志国(1986—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为船舶与海洋结构物设计制造。E-mail: zgfu@ccs.org.cn

有结网衣、无结网衣、金属焊接网衣和金属编织网衣等<sup>[5]</sup>。

网衣是柔性体, 在外力作用下会发生较大变形, 且其材质和结构形式对性能影响很大。常见的网衣水动力载荷计算方法有:

1) 模型试验法<sup>[6-7]</sup>。王银涛等<sup>[8]</sup>基于物理模型试验研究了 1:100 的网箱模型水动力特性, 发现网衣对网箱波浪力的影响可以使用网衣孔隙率来表示; 赖艳<sup>[9]</sup>采用单片网衣实物模型, 研究了网衣附着海洋生物后的水动力特性, 发现海洋生物附着对网衣惯性力系数的影响不大, 但会导致拖曳力系数显著增大。网衣在水中的受力十分复杂, 模型试验是获得网衣水动力系数最可靠的方法, 但模型试验成本较高, 无法大规模推广。

2) 数值模拟法。多年来, 众多学者采用数值模拟方法对网衣的水动力特性进行研究, 根据网衣水动力学模型理论的不同<sup>[10]</sup>, 可以分为 3 种。(a) 莫里森 (Morison) 公式法<sup>[11-16]</sup>: Cheng 等<sup>[17]</sup>对比了 5 种 Morison 模型和 6 种 Screen 模型, 为网衣水动力分析选择合适的水动模型提供了指导; (b) 多孔介质法<sup>[18-22]</sup>: 陈诚等<sup>[23]</sup>将网衣视为一种多孔介质, 从宏观角度分析网衣与水流的相互作用, 提出了一种针对极端波浪的网衣多孔介质阻力预报方法; (c) 屏模型法: 苗玉基等<sup>[24]</sup>将网衣看作一个均匀的且具有一定形状的屏, 通过数值模拟和水槽试验, 对比发现屏模型能较好地预报网衣受到的波浪载荷。在有限元模型计算方面, 张婧等<sup>[25]</sup>基于集中质量点法<sup>[26]</sup>, 采用 OrcaFlex 软件建立了网衣模型, 研究了组合式网箱在波流作用下的水动力性能。施兴华等<sup>[27]</sup>采用网目群化法<sup>[28]</sup>, 将网衣的众多网目按照一定规则划分成不同的群组, 通过调整水动力系数, 可以快速计算出网衣在水流作用下的变形和受力情况。数值模拟法较为复杂, 且对于渔业养殖平台的设计人员而言, 掌握全部数值模拟方法十分困难, 业界期望得到网衣水动力的统一做法, 中国船级社 (简称 CCS) 发布的《海上渔业养殖设施指南》很好地解决了这个问题。

3) 规范计算方法。CCS《海上渔业养殖设施指南》, 总结了网衣对各种类型渔业养殖平台性能的影响, 以及网衣水动力分析的相关流程, 并针对纤维网衣, 给出了水动力载荷系数计算的经验公式, 同时针对金属网衣, 给出了等效模拟的原则性方法; 挪威标准化协会发布的标准《Floating Aqua-

culture Farms-Site Survey, Design, Execution and Use》和挪威船级社发布的规范《Floating Fish Farming Units and Installations》, 给出了使用安全系数校核网衣完整性的方法<sup>[29]</sup>。规范算法具有成本低且速度快的优点, 但其适用范围相对有限, 目前主要用于特定材质的网衣水动力计算。

本文通过分析不同类型网衣的结构特点, 依据 CCS《海上渔业养殖设施指南》的相关要求, 着重分析了纤维网衣和金属网衣的规范计算方法, 推导出适用于不同网孔形状和结构形式的纤维网衣和金属网衣的网衣水动力载荷系数计算公式, 以期渔业养殖平台网衣选型和水动力载荷计算提供理论参考。

## 1 纤维网衣水动力载荷规范计算方法

网衣密实度是指网衣实体投影面积与轮廓面积的比值, 它对网衣水动力载荷具有显著影响, 尤其是纤维网衣。因此, 在计算网衣受到的水动力载荷时, 应先确定网衣密实度。

### 1.1 纤维网衣密实度计算方法

#### 1.1.1 无结网衣

无结网衣是指由网线相互交织而构成的没有网结的网片, 根据网孔形状可分为矩形、菱形和六边形无结网衣, 如图 1—图 3 所示。

矩形无结网衣是最常见的网衣类型 (图 1)。由于其 4 个角相对固定, 在固定网衣过程中更容易确

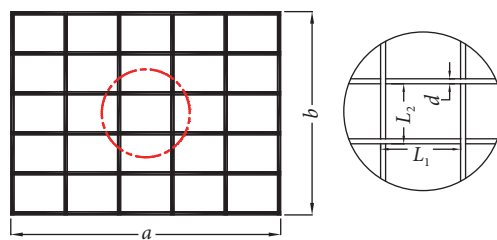


图1 矩形无结网衣

Fig. 1 Rectangular knotless netting

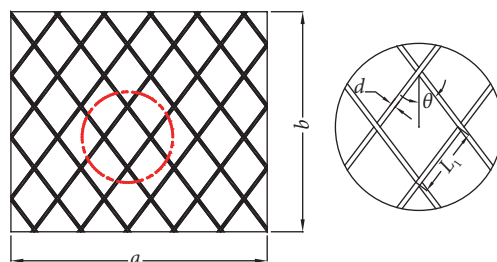


图2 菱形无结网衣

Fig. 2 Diamond knotless netting

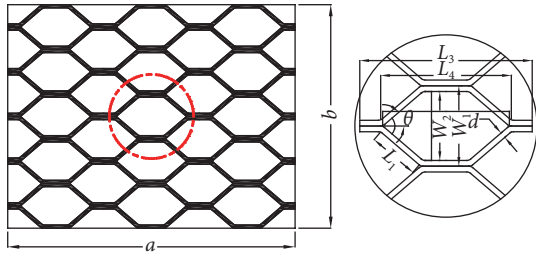


图3 六边形无结网衣

Fig. 3 Hexagon knotless netting

定位置和方向。矩形无结网衣的密实度 ( $S_n$ ) 计算公式为:

$$S_n = \frac{L_1 L_2 - (L_1 - d)(L_2 - d)}{L_1 L_2} = \frac{(L_1 + L_2)d - d^2}{L_1 L_2} \quad (1)$$

式中:  $L_1$  为网目边长 (m);  $L_2$  为网目宽度 (m);  $d$  为网线直径 (m)。

如图2所示, 菱形无结网衣在受力时具有独特

$$S_n = \frac{4 \times \left[ \frac{L_3}{2} \times \frac{W_1}{2} - 2 \times \left( \frac{L_4}{2} - \frac{W_2}{2} \cot \theta \right) \times \frac{W_2}{2} - 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{W_2}{2} \times \frac{W_2}{2} \cot \theta \right]}{4 \times \frac{L_3}{2} \times \frac{W_1}{2}} = \frac{L_3 W_1 - 2 \times L_4 W_2 + W_2^2 \cot \theta}{L_3 W_1} \quad (3)$$

式中:  $L_3$  为同一高度相邻2个六边形网目中心距离 (m);  $L_4$  为六边形网目内径长度 (m);  $W_1$  为六边形网目宽度 (m);  $W_2$  为六边形网目内径宽度 (m);  $2\theta$  为菱形网目夹角 ( $^\circ$ )。

### 1.1.2 有结网衣

如图4所示, 与无结网衣相比, 有结网衣的网结处可以承受更大的拉力, 有助于增强网衣的强度。有结网衣的网结可分为活结、死结和双死结等结构形式, 如果将网结等效为一个球体 (图5), 其网衣密实度计算公式为:

$$S_n = \frac{2L_1 d - \frac{d^2}{\sin 2\theta} + \left( \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2} - \frac{d}{2 \tan \theta} \right)^2 \times \pi}{L_1^2 \sin 2\theta} \quad (4)$$

式中:  $L_1$  为网目边长 (m);  $d$  为网线直径 (m);  $D$  为网结等效直径 (m), 且  $D \geq \frac{d}{\sin \theta}$ ;  $2\theta$  为菱形网目

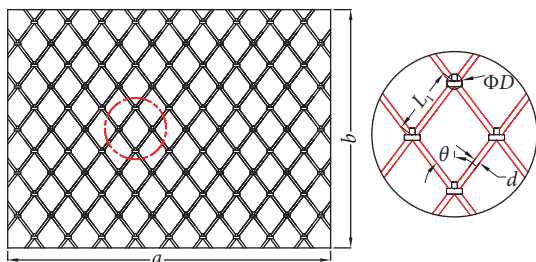


图4 有结网衣 (死结)

Fig. 4 Knot netting (Rigid knot)

的力学性能, 菱形网孔能够将力沿着对角线方向分散传递, 相比方形网孔的网衣, 具有更好的抗变形能力。其网衣密实度计算公式为:

$$S_n = \frac{2L_1^2 \sin 2\theta - \left( 2L_1 \cos \theta - \frac{d}{\sin \theta} \right) \times \left( 2L_1 \sin \theta - \frac{d}{\cos \theta} \right)}{2L_1^2 \sin 2\theta} = \frac{2L_1 d - \frac{d^2}{\sin 2\theta}}{L_1^2 \sin 2\theta} \quad (2)$$

式中:  $L_1$  为网目边长 (m);  $d$  为网线直径 (m);  $2\theta$  为菱形网目夹角 ( $^\circ$ )。

如图3所示, 与矩形或菱形无结网衣相比, 六边形无结网衣能够实现更紧密的排列。这意味着在保证网衣强度的同时, 可以减少网线使用量, 从而有效降低网衣的质量。其网衣密实度计算公式为:

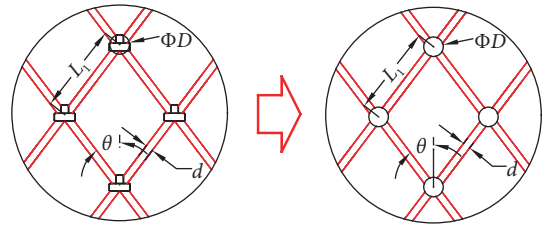


图5 网结等效示意图

Fig. 5 Equivalent schematic diagram of net knot

夹角 ( $^\circ$ )。

## 1.2 纤维网衣水动力载荷系数计算方法

根据 CCS《海上渔业养殖设施指南》, 对于渔业养殖平台常用的纤维网衣 (尼龙网、聚乙烯网、超高分子量聚乙烯网等), 可采用公式 (5) 和 (6) 对莫里森方程中的阻力系数  $C_d$  和升力系数  $C_l$  进行估算。

$$C_d = 0.04 + (-0.04 + S_n - 1.24 S_n^2 + 13.7 S_n^3) \cos(90 - \alpha) \quad (5)$$

$$C_l = (0.57 S_n - 3.54 S_n^2 + 10.1 S_n^3) \sin[2 \times (90 - \alpha)] \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为网衣冲角 ( $^\circ$ ), 如图6所示;  $S_n$  为网衣密实度,  $S_n \leq 0.35$ 。

网衣水动力载荷系数是计算网衣受力的关键指标, 获得网衣水动力载荷系数后, 即可通过莫里森方程等经验公式, 计算任意面积的网衣受力。

## 2 金属网衣水动力载荷规范计算方法

对于金属网衣, 可采用通用有限元软件建立网

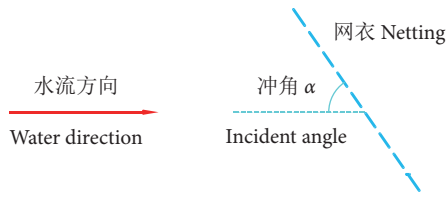


图6 网衣冲角示意图

Fig. 6 Schematic diagram of netting incident angle

衣结构几何模型,例如以梁单元作为网衣模型的基本单元,采用莫里森方程和数值积分的方法<sup>[30]</sup>,计算网衣受到的水动力载荷,但金属网衣网目尺寸相对较小,如果将网衣全部网目都用梁单元建模,会导致计算单元数量过于庞大,无法应用到工程实际。为减少计算单元数量,本文将一片网衣等效为横、竖两根虚拟杆件,以保证等效前后水动力荷载不变为前提,推导出了等效杆件水动力载荷系数的计算方法,过程如下。

根据莫里森方程可知,作用在金属网衣上的水动力载荷 ( $F$ ) 计算公式为:

$$F = F_D + F_I = \frac{1}{2} \rho C_D A_p U^2 + \rho C_M V \frac{\partial U}{\partial t} \quad (7)$$

式中:  $F_D$  为作用在网衣上的拖曳力 (N);  $F_I$  为作用在网衣上的惯性力 (N);  $\rho$  为液体密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $A_p$  为结构沿流体方向的投影面积 ( $\text{m}^2$ );  $U$  为流体速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $C_D$  为拖曳力系数;  $C_M$  为惯性力系数;  $V$  为构件体积 ( $\text{m}^3$ )。

根据公式 (7) 可知,当液体密度和流体速度相对不变时,只需保证网衣在沿流体方向上的投影面积与等效虚拟杆在相同方向上的投影面积相同,即可以保证等效前后的拖曳力相同,因此可以得到公式 (8):

$$C_{Dex} D_{ex} L_x + C_{Dey} D_{ey} L_y = \sum d C_{Dei} L_i \quad (8)$$

式中:  $C_{Dex}$  为等效虚拟横杆的拖曳力系数;  $D_{ex}$  为等效虚拟横杆直径 (m);  $L_x$  为等效虚拟横杆长度 (m);  $C_{Dey}$  为等效虚拟竖杆的拖曳力系数;  $D_{ey}$  为等效虚拟竖杆直径 (m);  $L_y$  为等效竖杆长度 (m);  $d$  为网线直径 (m);  $C_{Dei}$  为网线拖曳力系数;  $L_i$  为一个网目中网线长度 (m)。

根据公式 (7) 可知,当液体密度和流体速度相对不变时,只需保证网衣排水体与等效虚拟杆排水体积相同,即可以保证等效前后的惯性力相同,因此可以得到公式 (9):

$$\frac{\pi}{4} C_{Mx} D_{ex}^2 L_x + \frac{\pi}{4} C_{My} D_{ey}^2 L_y = \sum \frac{\pi}{4} d^2 C_{Mi} L_i \quad (9)$$

式中:  $C_{Mx}$  为等效横杆的惯性力系数;  $C_{My}$  为等效

虚拟竖杆的惯性力系数;  $C_{Mi}$  为网线的惯性力系数。

## 2.1 金属焊接网衣水动力载荷系数计算方法

### 2.1.1 矩形金属焊接网衣

如图 7 所示,以矩形金属焊接网衣为例,对 ( $a \times b$ ) 大小网衣,可以等效为横、竖两根杆,为保证等效前后拖曳力相同,根据公式 (3) 和 (8) 可知:

$$a D_{ex} C_{Dex} + b D_{ey} C_{Dey} = \frac{(L_1 + L_2) d - d^2}{L_1 L_2} \times ab \times C_{Dei} \quad (10)$$

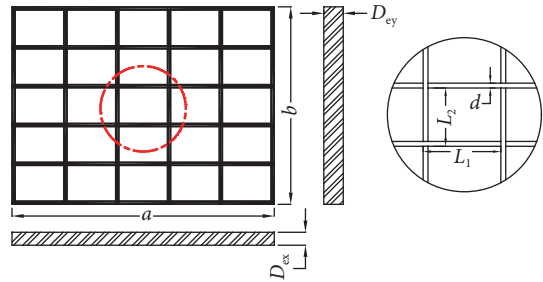


图7 矩形金属焊接网衣

Fig. 7 Rectangular welded metal netting

假设  $\frac{C_{Dex}}{C_{Dey}} = \frac{b}{a}$ , 则

$$C_{Dex} = \frac{(L_1 + L_2) d - d^2}{L_1 L_2 (D_{ex} + D_{ey})} \times b \times C_{Dei} \quad (11)$$

$$C_{Dey} = \frac{(L_1 + L_2) d - d^2}{L_1 L_2 (D_{ex} + D_{ey})} \times a \times C_{Dei} \quad (12)$$

为保证等效前后惯性力相同,根据公式 (9) 可知:

$$\frac{\pi}{4} C_{Mx} D_{ex}^2 a + \frac{\pi}{4} C_{My} D_{ey}^2 b = \frac{b}{L_2} \times \frac{a}{L_1} \times \left( L_1 \times \frac{d^2 \pi}{4} + L_2 \times \frac{d^2 \pi}{4} - \frac{2d^3}{3} \right) \times C_{Mi} \quad (13)$$

假设  $C_{Mx}$  和  $C_{My}$  相等, 则

$$C_{Mx} = C_{My} = \frac{ab d^2 C_{Mi}}{L_1 L_2} \times \frac{\left( L_1 + L_2 - \frac{8d}{3\pi} \right)}{a D_{ex}^2 + b D_{ey}^2} \quad (14)$$

### 2.1.2 菱形金属焊接网衣

如图 8 所示,以菱形金属焊接网衣为例,对 ( $a \times b$ ) 大小网衣,可以等效为横、竖两根杆,为保证等效前后拖曳力相同,根据公式 (4) 和 (8) 可知:

$$a D_{ex} C_{Dex} + b D_{ey} C_{Dey} = \frac{2L_1 d - \frac{d^2}{\sin 2\theta}}{L_1^2 \sin 2\theta} \times ab \times C_{Dei} \quad (15)$$

假设  $\frac{C_{Dex}}{C_{Dey}} = \frac{b}{a}$ , 则

$$C_{Dex} = \frac{2L_1 d - \frac{d^2}{\sin 2\theta}}{L_1^2 \sin 2\theta} \times \frac{b C_{Dei}}{(D_{ex} + D_{ey})} \quad (16)$$



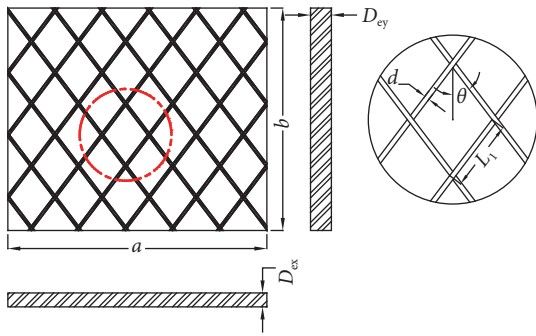


图8 菱形金属焊接网衣

Fig. 8 Diamond welded metal netting

$$C_{Dey} = \frac{2L_1 - \frac{d^2}{L_1^2 \sin 2\theta}}{\sin 2\theta} \times \frac{a C_{Dei}}{(D_{ex} + D_{ey})} \quad (17)$$

为保证等效前后的惯性力相同, 根据公式 (9) 可知:

$$\frac{\pi}{4} C_{Mx} D_{ex}^2 a + \frac{\pi}{4} C_{My} D_{ey}^2 b = \frac{b}{L_1 \cos \theta} \times \frac{a}{L_1 \sin \theta} \times \frac{1}{4} \times \left( 2L_1 \times \frac{d^2 \pi}{4} - \frac{2d^3}{3} \sin 2\theta \right) \times C_{Mi} \quad (18)$$

假设  $C_{Mx}$  和  $C_{My}$  相等, 则

$$C_{Mx} = C_{My} = \frac{abd^2 C_{Mi}}{L_1^2 \sin 2\theta} \times \frac{\left( L_1 - \frac{4d}{3\pi} \sin 2\theta \right)}{aD_{ex}^2 + bD_{ey}^2} \quad (19)$$

## 2.2 金属编织网衣水动力载荷系数计算方法

如图9所示, 以金属编织网衣为例, 对  $(a \times b)$  大小网衣, 可以等效为横、竖两根杆, 为保证等效前后拖曳力相同, 根据公式 (8) 可知:

$$aD_{ex} C_{Dex} + bD_{ey} C_{Dey} = \frac{(4a - W) b \times C_{Dei}}{2W \times L_5} \times \left[ 2D_1 L_6 + \frac{(L_5 - 2L_6)}{\cos \theta} \times 2d \right] \quad (20)$$

式中:  $2L_5$  为同一竖向位置相邻两个网目顶点之间的距离 (m);  $D_1$  为网目编织段等效直径 (m);  $2L_6$  为网目编织段长度 (m);  $W$  为网目宽度 (m);  $d$  为网线直径 (m);  $2\theta$  为网目夹角 ( $^\circ$ )。

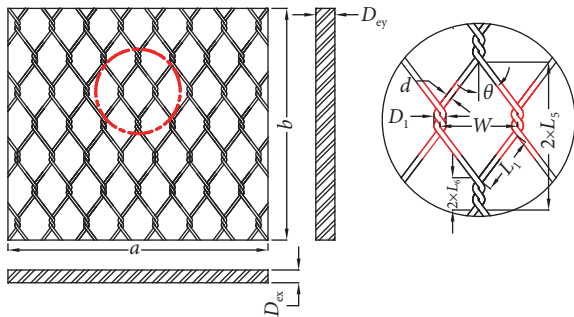


图9 金属编织网衣

Fig. 9 Metal woven netting

假设  $\frac{C_{Dex}}{C_{Dey}} = \frac{b}{a}$ , 则

$$C_{Dex} = \frac{(4a - W) b \times C_{Dei}}{W \times L_5} \times \frac{\left[ D_1 L_6 + \frac{(L_5 - 2L_6)}{\cos \theta} \times d \right]}{a \times (D_{ex} + D_{ey})} \quad (21)$$

$$C_{Dey} = \frac{(4a - W) \times C_{Dei}}{W \times L_5} \times \frac{\left[ D_1 L_6 + \frac{(L_5 - 2L_6)}{\cos \theta} \times d \right]}{(D_{ex} + D_{ey})} \quad (22)$$

为保证等效前后惯性力相同, 根据公式 (9) 可知:

假设  $C_{Mx}$  和  $C_{My}$  相等, 则

$$\frac{\pi}{4} C_{Mx} D_{ex}^2 a + \frac{\pi}{4} C_{My} D_{ey}^2 b = \frac{(4a - W) b}{2W \times L_5} \times \left[ 2L_6 \times \frac{D_1^2 \pi}{4} + \frac{4 \times (L_5 - 2L_6)}{2 \cos \theta} \times \frac{d^2 \pi}{4} \right] \times C_{Mi} \quad (23)$$

$$C_{Mx} = C_{My} = \frac{(4a - W) b C_{Mi}}{W \times L_5 \cos \theta} \times \frac{[L_6 D_1^2 \cos \theta + d^2 (L_5 - 2L_6)]}{aD_{ex}^2 + bD_{ey}^2} \quad (24)$$

在对金属网衣进行等效处理时, 应注意以下问题: 1) 等效的横杆和竖杆都是虚拟的, 如在有限元模型中建立这些虚拟杆, 应将其刚度设为很小的值, 仅计算虚拟杆受到的载荷, 但不计其对结构强度的贡献; 2) 根据公式 (8) 和 (9) 可知, 等效虚拟杆的拖曳力系数和惯性力系数与虚拟杆的直径有关, 需要先设定虚拟杆的直径, 才能计算出虚拟杆的拖曳力系数和惯性力系数; 3) 根据公式 (7) 可知, 当液体密度和流体速度相对不变时, 网衣拖曳力由网衣投影面积决定, 网衣惯性力由网衣体积决定, 常见的网箱网衣都是固定在由若干圆管组成的框架上, 网衣固定好后, 其投影面积较大, 但其所占的体积并不大, 因此网衣受到的水动力中拖曳力所占比例远大于惯性力所占比例; 4) 如等效杆直径设定为与网线直径相当 (即远小于网衣支撑圆管直径), 部分有限元软件在进行整体求解时会报错, 此时可将等效杆直径设定为与网衣支撑圆管直径相当, 重新进行计算, 但这种方法计算出的惯性力系数非常小, 可以忽略不计。

## 3 网孔形状和结构形式对网衣水动力载荷的影响

### 3.1 纤维网衣

为研究网孔形状对网衣水动力载荷的影响, 选取网目边长相同的矩形、菱形和六边形无结纤维网衣, 以及菱形有结网衣进行对比分析, 网衣大小均为  $3\,000\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$ , 各网衣的参数如表1所示。

表1 网衣参数  
Table 1 Netting parameter

参数 Parameter		数值 Value
矩形无结网衣 Rectangular knotless netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	网目宽度 Mesh width/mm	50
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
菱形无结网衣 Diamond knotless netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
	菱形网目夹角 Diamond mesh angle/(°)	60
六边形无结网衣 Hexagon knotless netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	相邻网目顶点距离 Distance between adjacent mesh vertices/mm	187
	六边形网目内径长度 Hexagonal mesh inner diameter length/mm	137
	六边形网目宽度 Hexagonal mesh width/mm	58
	六边形网目内径宽度 Hexagonal mesh inner diameter width/mm	50
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
	菱形网目夹角 Diamond mesh angle/(°)	60
菱形有结网衣 Diamond knot netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
	菱形网目夹角 Diamond mesh angle/(°)	60
	网结等效直径 Equivalent diameter of net knot/mm	12

根据公式 (1)—(4)，可计算出各网衣的密实度，在冲角为 45°、60°、75° 和 90° 时，根据公式 (5) 和 (6)，可以计算出各网衣的阻力系数  $C_d$  和升力系数  $C_l$ ，计算结果如表 2 所示。

表2 网衣等效计算结果  
Table 2 Equivalent calculation results of netting

参数 Parameter		冲角 Incident angle			
		45°	60°	75°	90°
矩形无结网衣 Rectangular knotless netting	网衣密实度 Netting solidity	0.154	0.154	0.154	0.154
	阻力系数 Drag coefficient	0.135	0.156	0.169	0.174
	升力系数 Lift coefficient	0.041	0.035	0.020	0
菱形无结网衣 Diamond knotless netting	网衣密实度 Netting solidity	0.176	0.176	0.176	0.176
	阻力系数 Drag coefficient	0.162	0.190	0.207	0.213
	升力系数 Lift coefficient	0.046	0.040	0.023	0
六边形无结网衣 Hexagon knotless netting	网衣密实度 Netting solidity	0.136	0.136	0.136	0.136
	阻力系数 Drag coefficient	0.116	0.133	0.144	0.148
	升力系数 Lift coefficient	0.037	0.032	0.019	0
菱形有结网衣 Diamond knot netting	网衣密实度 Netting solidity	0.183	0.183	0.183	0.183
	阻力系数 Drag coefficient	0.171	0.201	0.219	0.226
	升力系数 Lift coefficient	0.048	0.041	0.024	0

如图 10 所示，对于无结纤维网衣，当网目边长相同时，在相同冲角条件下，六边形网衣的密实度最小，对应网衣的阻力系数和升力系数最小；菱形网衣的密实度最大，对应网衣的阻力系数和升力系数最大。对于相同网孔形状 (菱形) 的纤维网衣，有结网衣的密实度和对应网衣的阻力系数和升力系数均大于无结网衣。

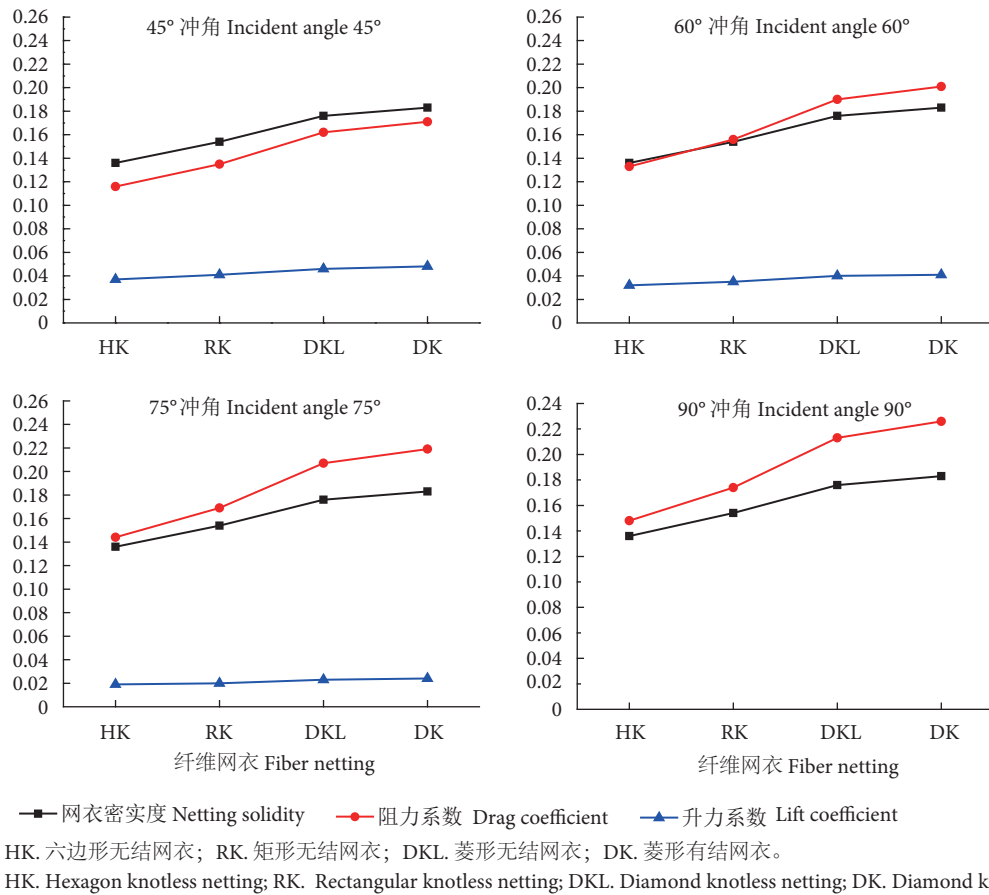


图10 纤维网衣等效计算结果

Fig. 10 Equivalent calculation results of fiber netting

### 3.2 金属网衣

为研究网孔形状对网衣水动力载荷的影响,选取网目边长相同的矩形金属焊接网衣、菱形金属焊接网衣和金属编织网衣进行对比分析,网衣大小均为 3 000 mm×2 000 mm,各网衣的参数如表 3 所示。

对于渔业养殖平台,网衣通常是固定在舢装件上,以常见的直径为 273 mm 的圆管为例,将大小为 3 000 mm×2 000 mm 的金属网衣等效为 1 根横杆和 1 根竖杆,同时假定等效杆直径为 273 mm,等效竖杆和横杆的拖曳力系数比为 3 : 2,惯性力系数相同根据公式 (11)、(12)、(14)、(16)、(17)、(19)、(21)、(22) 和 (24),可以计算出不同类型网衣的等效计算结果,如表 4 所示。

如图 11 所示,对于金属网衣,当网目边长相同时,矩形焊接网衣对应等效横杆和竖杆的拖曳力系数最小,网衣受到的水动力载荷也最小;金属编织网衣对应等效横杆和竖杆的拖曳力系数最大,网衣受到的水动力载荷也最大。

## 4 结论

在渔业养殖平台的设计过程中,应根据网衣的结构形式和材料特点,采用模型试验、数值模拟或规范计算的方法确定网衣受到的水动力载荷。本研究依据 CCS《海上渔业养殖设施指南》的相关要求,着重对纤维网衣和金属网衣水动力载荷的规范计算方法进行了研究,得出结论如下:

1) 当网目边长相同时,对于无结纤维网衣,六边形网衣的密实度最小,对应网衣的阻力系数和升力系数最小,即六边形网衣受到的水动力载荷最小;菱形网衣的密实度最大,对应网衣的阻力系数和升力系数最大,即菱形网衣受到的水动力载荷最大;

2) 当网目边长相同、网孔形状相同时,有结网衣的密实度和对应网衣的阻力系数和升力系数均大于无结网衣,即有结网衣受到的水动力载荷大于无结网衣;

3) 当网目边长相同时,对于金属网衣,矩形焊接网衣对应等效横杆和竖杆的拖曳力系数最小,

表3 网衣参数  
Table 3 Netting parameter

参数 Parameter		数值 Value
矩形金属焊接网衣 Rectangular welded metal netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	网目宽度 Mesh width/mm	50
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
	网线拖曳力系数 Net twine drag coefficient	0.65
	网线惯性力系数 Inertial force coefficient of net twine	2.0
	网衣长度 Netting length/mm	3 000
	网衣宽度 Netting width/mm	2 000
菱形金属焊接网衣 Diamond welded metal netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
	菱形网目夹角 Diamond mesh angle/(°)	60
	网线拖曳力系数 Net twine drag coefficient	0.65
	网线惯性力系数 Inertial force coefficient of net twine	2.0
	网衣长度 Netting length/mm	3 000
	网衣宽度 Netting width/mm	2 000
金属编织网衣 Metal woven netting	网目边长 Mesh edge length/mm	50
	相邻网目顶点距离 Distance between adjacent mesh vertices/mm	115
	编织段长度 Woven length/mm	25
	网目夹角 Mesh angle/(°)	60
	网线直径 Net twine diameter/mm	4
	网目宽度 Mesh width/mm	60
	编织段等效直径 Equivalent diameter of woven/mm	8.5
	网线拖曳力系数 Net twine drag coefficient	0.65
	网线惯性力系数 Inertial force coefficient of net twine	2.0
	网衣长度 Netting length/mm	3 000
	网衣宽度 Netting width/mm	2 000

表4 网衣等效计算结果  
Table 4 Equivalent calculation results of netting

参数 Parameter		数值 Value
矩形金属焊接网衣 Rectangular welded metal netting	等效横杆直径 Equivalent horizontal bar diameter/mm	273
	等效竖杆直径 Equivalent vertical bar diameter/mm	273
	等效横杆拖曳力系数 Equivalent drag coefficient of horizontal bar	0.366
	等效竖杆拖曳力系数 Equivalent drag coefficient of vertical bar	0.549
	等效横杆和竖杆惯性力系数 Equivalent inertia force coefficients for horizontal and vertical bars	0.020
菱形金属焊接网衣 Diamond welded metal netting	等效横杆直径 Equivalent horizontal bar diameter/mm	273
	等效竖杆直径 Equivalent vertical bar diameter/mm	273
	等效横杆拖曳力系数 Equivalent drag coefficient of horizontal bar	0.420
	等效竖杆拖曳力系数 Equivalent drag coefficient of vertical bar	0.629
	等效横杆和竖杆惯性力系数 Equivalent inertia force coefficients for horizontal and vertical bars	0.012
金属编织网衣 Metal woven netting	等效横杆直径 Equivalent horizontal bar diameter/mm	273
	等效竖杆直径 Equivalent vertical bar diameter/mm	273
	等效横杆拖曳力系数 Equivalent drag coefficient of horizontal bar	0.704
	等效竖杆拖曳力系数 Equivalent drag coefficient of vertical bar	1.056
	等效横杆和竖杆惯性力系数 Equivalent inertia force coefficients for horizontal and vertical bars	0.056



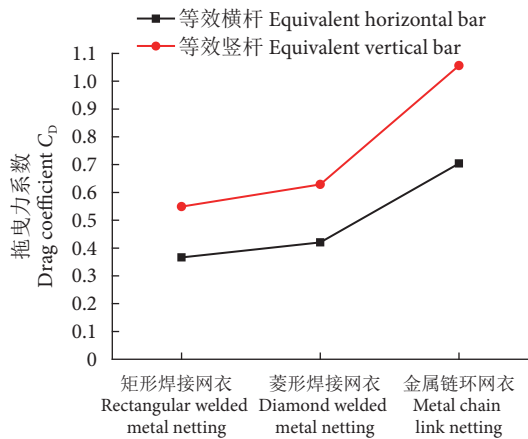


图11 金属网衣等效计算结果

Fig. 11 Equivalent calculation results of metal netting

即网衣受到的水动力载荷最小。

本研究成果可为渔业养殖平台网衣的选型和水动力计算提供一定参考。但本研究仅考虑了清洁网衣的受力情况,未来的研究可将海洋生物附着对网衣水动力特性的影响作为重要的考虑因素,进一步完善规范计算方法。此外,总结现有渔业养殖平台选择网衣的成功经验,推动“标准网衣”概念的发展,即将网衣按材质、网目形状和网目尺寸等条件进行分类,计算出各类网衣所受水动力载荷的标准值(规范值),可大大简化网衣水动力载荷的计算,也是后续研究的目标。

#### 参考文献:

- [1] 黄小华, 庞国良, 袁太平, 等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121-131.
- [2] 桂福坤, 祝含接, 冯德军. 海洋养殖网衣水动力特性研究进展[J]. 渔业现代化, 2019, 46(5): 9-14, 21.
- [3] 薄佳男, 林可, 马家志, 等. 高分子编结网片水动力特性水槽试验研究[J]. 渔业现代化, 2020, 47(1): 72-79.
- [4] 徐俊杰. PET 网衣综合性能分析及其在可升降式网箱上的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023: 11-14.
- [5] 钱忠敏. 我国深远海养殖网箱网衣材料现状及发展趋势浅析[J]. 中国水产, 2023(8): 43-45.
- [6] 田雨. 流作用下平面网衣水动力特性及变形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023: 3-6.
- [7] LEI Y, ZHENG X Y, LI W, et al. Experimental study of the state-of-the-art offshore system integrating a floating offshore wind turbine with a steel fish farming cage[J]. Mar Structures, 2021, 80: 103076.
- [8] 王银涛, 王千, 郭晓宇. 规则波作用下养殖网箱水动力特性分析[J]. 渔业现代化, 2023, 50(2): 40-49.
- [9] 赖艳. 硬质生物附着下网衣水动力特性实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024: 12-34.
- [10] 周应祺, 许柳雄. 渔具力学[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 134-178.
- [11] 凌爱军, 梁园华, 赵德辉, 等. 海洋养殖柔性网衣结构水动力特性研究进展[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 223-236.
- [12] CIFUENTES C, KIM M H. Hydrodynamic response of a cage system under waves and currents using a Morison-force model[J]. Ocean Engin, 2017, 141: 283-294.
- [13] 李娜, 李昕, 施伟, 等. 波流作用下平面网衣水动力特性数值模拟[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(2): 509-519.
- [14] 吴皓, 刘强, 范为. 养殖网箱网纲和网衣水动力载荷研究[J]. 渔业现代化, 2023, 50(5): 43-51.
- [15] 李鹏, 韩鑫悦, 秦洪德, 等. 小尺度平面网衣流场特性数值研究[J]. 应用科技, 2022, 49(1): 1-7.
- [16] WANG G, MARTIN T, HUANG L, et al. An improved screen force model based on CFD simulations of the hydrodynamic loads on knotless net panels[J]. Appl Ocean Res, 2022, 118: 102965.
- [17] CHENG H, LI L, AARSTHER K G, et al. Typical hydrodynamic models for aquaculture nets: a comparative study under pure current conditions[J]. Aquac Engin, 2020, 90: 102070.
- [18] 高璠, 孙树政, 刘富祥, 等. 离岸养殖装备网衣周围流场特性研究[J]. 中国造船, 2024, 65(1): 256-266.
- [19] 张为, 郭军, 扈喆, 等. 基于 CFD 的刚性养殖网衣流场数值模拟及不确定度分析[J]. 渔业研究, 2023, 45(3): 254-262.
- [20] 俞嘉臻, 张显涛, 李欣. 聚焦波作用下平面网衣结构的水动力特性研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(5): 98-110.
- [21] 孙国庆. 网架式网箱内部波流场数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 15-17.
- [22] 刘富祥, 孙国庆, 孙树政. 基于多孔介质模型的网衣对波流场影响的数值模拟研究[J]. 中国造船, 2022, 63(2): 172-180.
- [23] 陈诚, 宋伟, 谢正丽, 等. 基于多孔介质模型的养殖装备网衣水动力特性研究[J]. 渔业现代化, 2022, 49(5): 115-126.
- [24] 苗玉基, 丁军, 田超, 等. 波浪作用下网衣结构承受载荷研究[J]. 中国造船, 2020, 61(2): 210-219.
- [25] 张婧, 孙立文, 周游, 等. 组合钢架式网箱水动力性能分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(6): 27-34.
- [26] 杨静宇, 李靖. 基于质量集中法和迭代法的平面网衣变形模拟[J]. 装备制造技术, 2022(1): 73-77.
- [27] 施兴华, 周游, 钱估麒, 等. 基于水动力性能的网箱网衣网目群化数值模拟方法研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(3): 74-79, 96.
- [28] 陈元帅, 庞国良, 黄小华, 等. 网衣对自升式桁架网箱结构响应的影响[J]. 南方水产科学, 2024, 20(1): 43-53.
- [29] 马宏达, 韩荣贵, 马刚, 等. 渔业网衣完整性计算方法研究[J]. 中国造船, 2023(5): 272-285.
- [30] TSUKROV I, DRACH A, DECEW J, et al. Experimental studies and numerical modeling of copper nets in marine environment[C]//Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy. Rotterdam, The Netherlands. June 19-24, 2011. ASME, 2011: 97-104.