

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230302002

<http://www.yykxjz.cn/>

凌爱军, 梁园华, 赵德辉, 范仲琪, 赵云鹏. 海洋养殖柔性网衣结构水动力特性研究进展. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 223–236

LING A J, LIANG Y H, ZHAO D H, FAN Z Q, ZHAO Y P. Research process for the hydrodynamic characteristics of flexible net structures for offshore aquaculture. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(4): 223–236

海洋养殖柔性网衣结构水动力特性研究进展^{*}

凌爱军¹ 梁园华¹ 赵德辉³ 范仲琪² 赵云鹏^{2①}

(1. 中国船级社海洋工程技术中心 天津 300457; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室
辽宁 大连 116024; 3. 大连市长海县海洋与渔业综合行政执法队 辽宁 大连 116024)

摘要 发展深水网箱养殖是保障我国粮食及食品安全的长远战略,也是缓解近海网箱养殖环境胁迫力、拓展食物生产空间的必然选择。发展深水网箱养殖首先需要面对的突出挑战是养殖设施在外海恶劣海况下的安全性问题。网衣是深水网箱的主体结构,由于其自身具有高柔性、小尺度的特点,在波浪和水流作用下易出现大位移和大变形的极端响应。当前,网衣结构分析技术已成为我国深水网箱养殖工程技术的薄弱环节,一定程度上制约当前海上养殖网箱向大型化和深水化发展。因此,网衣水动力特性研究对于深海网箱养殖的发展具有重要意义。本研究系统介绍了计算网衣水动力荷载的主要方法及其适用范围。同时,对网衣动态响应数值计算中的主流建模技术进行了总结和分析。最后,根据目前网衣水动力特性研究中存在的热点问题,提出了网衣流固耦合分析、生物污损分析、数字孪生技术等前沿发展方向,为网衣水动力学分析向数字化、精准化发展提供参考。

关键词 深水网箱养殖; 网衣; 水动力特性; 有限元方法; 计算流体力学

中图分类号 TV13 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)04-0223-14

随着世界人口数量的不断增长,人们对于水产品的需求逐年上升。水产养殖作为可持续发展产业,为满足人们日益增长的水产品需求提供了新方向。联合国粮食及农业组织的报告显示,2020年全球鱼类产量约为2.14亿t,其中,来自水产养殖的部分约占总产量的49.2%,水产养殖业在全球水产品供应中具有重要地位(FAO, 2022)。网箱养殖作为水产养殖中的代表性养殖方式之一,在全球水产养殖业中应用广泛。在过去的几十年,浅水区域的网箱养殖呈现指数式增长,但由于近海区域空间有限,使得网箱养殖逐渐转移至深海。尽管在开敞海域进行大规模网箱养殖可以有效地满足人们对于水产品的需求,并减少温室气体的排放,但仍存在一些限制因素。其中最主要的是,

当养殖网箱安置在开敞海域时,结构会面临更加恶劣的海况。为了实现海洋养殖的安全生产,研究养殖网箱的抗风浪技术至关重要。

网衣系统作为养殖网箱的重要组成部分,其主要作用是维护养殖空间、保护养殖对象、防止养殖对象逃逸并抵御天敌侵袭。在波流场中,网衣系统会承受作用在养殖设施上的大部分荷载。相比于其他传统海洋结构物,网衣具有小尺度、高柔性的力学特点,在外力作用下网衣会产生大位移与大变形,导致养殖空间减小、养殖对象因拥挤而损伤的几率上升。同时,网衣的存在会改变养殖设施周围的波流场,影响结构中剩余饵料、养殖对象排泄物和水中溶解氧的分布。因此,系统掌握网衣的水动力特性尤为重要。

* 国家重点研发计划(2020YFD0901001)资助。凌爱军, E-mail: ajling@ccs.org.cn

① 通信作者: 赵云鹏, 教授, E-mail: ypzha@dlut.edu.cn

收稿日期: 2023-03-02, 收修改稿日期: 2023-04-10

随着网箱养殖的不断发展,网箱结构形式更加丰富,网箱需要面临的环境荷载更为复杂。网衣作为养殖网箱的关键部分,其水动力特性值得深入探索。本文根据现有文献从网衣水动力荷载、网衣动态响应及网衣周围波流场 3 个方面展开综述。通过总结以上 3 个方面的热点问题,归纳今后研究网衣水动力特性的发展方向,以期为保障网箱结构安全、实现水产养殖的可持续发展提供参考。

1 网衣水动力荷载研究

网箱养殖在以往的几十年中发展迅速。从 19 世纪 60 年代至今,网箱养殖技术日益成熟并逐渐实现商业化(Sievers *et al*, 2021)。由于人们对水产品的需求数量日益增长且近海区域空间有限,网箱养殖逐渐转向深远海。相比于近海,网箱在开敞海域需要面临更恶劣的海况。网衣作为养殖网箱中最敏感的组成部分,需要承受复杂的环境荷载以及海洋生物的撕咬与碰撞。因此,掌握不同环境条件和结构尺度下网衣水动力荷载的变化规律,对保障养殖对象安全、优化网箱结构设计尤为重要。

网衣由网线编织而成,由于网线直径远小于海域中常见波长,属于小尺度构件。为了实现网衣水动力荷载的快速预测,人们通常采用经验公式计算荷载。求解网衣水动力荷载的经验公式可分为两类:

Morison 模型:在求解过程中将网目目脚和结节分别假定为圆柱单元与球单元,通过 Morison 方程计算每根网线所受荷载,并求其矢量和近似代替作用在网衣上的水动力荷载(Morison, 1950)。Morison 方程如下:

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

式中, F_D 为作用在网衣上的拖曳力, F_I 为作用在网衣上的惯性力, ρ 为流体密度, A_p 为结构沿流体方向的投影面积, U 对应流体速度, C_D 表示拖曳力系数, C_M 为惯性力系数, $C_M = 1 + C_m$, C_m 为附加质量力系数, ∇ 为构件体积。

当网衣与流体产生相对运动时,Brebbia 等(1981)建议对静态 Morison 进行改写:

$$F = F_D + F_I = \frac{1}{2} \rho C_D A_p U_R^2 + \rho C_m \nabla \frac{\partial U_R}{\partial t} + \rho \nabla \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2)$$

式中, U_R 为结构与水质点之间的相对速度, $U_R = U - R$, R 为结构的速度。

面单元模型:该模型将整张网衣离散为若干相互连接的面单元,每个面单元覆盖实际网衣中的部分目

脚和结节。网衣水动力荷载可通过下式计算:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_p U^2 \quad (3)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A_p U^2 \quad (4)$$

式中, C_L 表示网衣升力系数。结合公式(1)~(4)可知,计算网衣水动力荷载的关键在于确定网衣水动力系数。

随着网衣材料、制造工艺的发展及网箱面临海况的多样化,网衣与流体之间的作用机理更为复杂,仅根据已有水动力系数估算网衣水动力荷载将导致较大误差。因此,通过模型试验或现场观测了解网衣的受力特点是必要的。Løland (1991)认为网衣水动力荷载与网衣的结构参数有关。然而,网衣结构参数的变化会改变网衣周围的流体属性,综合考虑网衣结构特征及流体属性的影响可提升网衣水动力荷载的预测精度(Dong *et al*, 2020)。此外,在养殖过程中,网衣会受到生物附着及鱼类的影响,二者均会改变网衣上的水动力荷载(He *et al*, 2018)。

为了全面了解网衣水动力荷载的变化特征,应分析多参数对网衣水动力荷载的影响。在以下内容中,将从网衣水动力系数及生物效应对网衣水动力荷载的影响两方面展开介绍。

1.1 网衣水动力系数

国内外学者主要从水流和波浪条件下,通过物理模型试验研究网衣的水动力系数。根据求解网衣水动力荷载经验公式的类别,分别对 Morison 模型与面单元模型的水动力系数开展综述。

1.1.1 Morison 模型 在水流条件下,网衣的水动力系数与雷诺数(Re)密切相关(Zhao *et al*, 2007a)。Kawakami (1964)通过 Morison 方程对均匀流作用下柔性网衣上的水动力荷载进行了计算,认为在水流条件下, Morison 方程中仅保留拖曳力项。网衣的拖曳力系数取决于网衣密实度(S_n)和水流攻角(α),相应参数的计算公式如下。

Fredheim(2005)提出了无结节菱形网目网衣密实度的计算公式:

$$S_n = \frac{d_w}{l_w E_H E_V} - \left(\frac{d_w}{l_w} \right)^2 \left(\frac{1}{E_H^2} + \frac{1}{E_V^2} \right) \quad (5)$$

式中, d_w 为网线直径, l_w 为目脚长度, $E_H = D_H / 2N_H l_w = \sin \alpha$, $E_V = D_V / 2N_V l_w = \cos \alpha$, D_H 和 D_V 分别表示网衣宽度和网衣高度, E_H 和 E_V 为水平方向和垂直方向的网目缩结系数, N_H 和 N_V 分别为沿网衣宽度方向的网目数量,沿网衣高度方向的网目数量, 2α 为网目张开角度,网衣基本属性如图 1 所示。

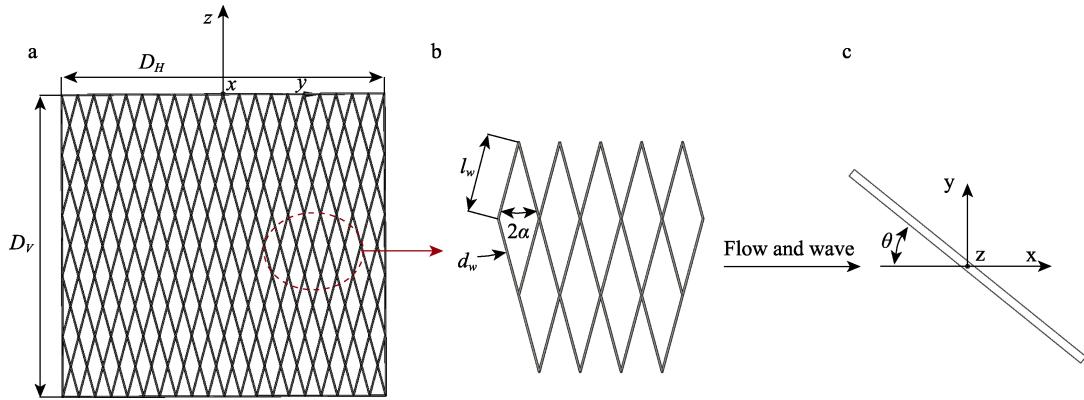


图1 网衣的基本属性

Fig.1 Fundamental properties of the net

a: 无结节菱形网目的网衣; b: 无结节菱形网目; c: 来流攻角的定义
a: Knotless hexagon-mesh net; b: Hexagon-mesh; c: Definition of attack angle

当网衣结节直径较大时($D_w/d_w=3.0\sim3.3$, 具体取值需对实际结节进行测量, D_w 为结节的直径), 计算网衣密实度的过程中需要考虑结节的面积(周应祺等, 2017)。对于菱形网目的有结节网衣, 其密实度可通过以下公式计算:

$$S_n = \frac{2l_w d_w + d_w^2}{2l_w^2 E_H E_V} - \left(\frac{d_w}{2l_w} \right)^2 \left(\frac{1}{E_H^2} + \frac{1}{E_V^2} \right) + \frac{\pi D_w^2 - 8d_w D_w}{8l_w^2 E_H E_V} \quad (6)$$

当 $E_H = E_V = 0.707$ 时为方形网目。

Choo 等(1971)对水流作用下缆绳上的水动力荷载进行了研究, 并将其分为两部分: 缆绳的法向荷载和切向荷载。对应公式如下:

$$C_{Dn} = \begin{cases} \frac{8\pi}{Re_n \cdot s} (1 - 0.87s^{-2}) & (0 < Re_n \leq 1) \\ 1.45 + 8.55 Re_n^{-0.90} & (1 < Re_n \leq 30) \\ 1.1 + 4 Re_n^{-0.50} & (30 < Re_n \leq 10^5) \end{cases} \quad (7)$$

$$C_{Dt} = \pi \mu (0.55 Re_n^{\frac{1}{2}} + 0.084 Re_n^{\frac{3}{2}}) \quad (8)$$

式中, C_{Dn} 和 C_{Dt} 分别为缆绳的法向和切向拖曳力系数。 μ 对应流体粘性, $s = -0.077215665 + \ln(8/Re_n)$ 。
 Re_n 为基于法向速度的雷诺数。

DeCew 等(2010)对公式(7)和(8)进行了拓展, 得到了水流作用下无结节方形网目网衣的拖曳力系数。

当网衣结节直径较大时($D_w/d_w=3.0\sim3.3$, 具体取值需对实际结节进行测量), 应考虑网衣结节的存在, 一般可将结节近似为球体进行处理(周应祺等, 2017)。Fredheim(2003)建议结节部分的拖曳力系数应该在1.0~2.0之间。该系数的选取需要结合网衣结节的编织方法、直径以及雷诺数等因素。

在波浪条件下, 网衣的水动力系数不仅与雷诺数有关, 还与 KC 数有关(赵云鹏, 2007)。基于尺度分析原理得出作用在单位长度圆柱上的波浪力可通过以下公式进行表示:

$$\frac{2F}{\rho L D U_m^2} = f \left[\frac{U_m T}{D}, \frac{U_m D}{v}, \frac{k}{D}, \frac{t}{T} \right] \quad (9)$$

式中, L 为圆柱的总长度, k 为圆柱表面的相对粗糙度, T 为波浪周期, U_m 为水质点在一个波周期内的最大速度, D 为圆柱直径。

联系 Morison 方程, 不考虑时间因素的影响可得:

$$C_D, C_M = f \left[K_c, Re, \frac{k}{D} \right] \quad (10)$$

式中, $K_c = (U_m T) / v$, $Re = (U_m D) / v$ 。

Zhao 等(2008)基于最小二乘法计算了波浪作用下网衣的水动力系数, 结果显示, 当网衣的 KC 数在150~350范围内时, KC 数对拖曳力系数的影响并不明显。同时发现, 波浪作用下, 拖曳力是网衣水动力荷载的主要部分, 网衣上的惯性力数值很小, 可以忽略。Zhao 等(2009)通过公式(9)和(10)计算了波浪作用下网线的拖曳力系数, 并通过试验进行验证。

Dong 等(2019)研究了网片在 Stokes 二阶波作用下的水动力系数, 并得出相应计算公式:

$$C_D = \begin{cases} 3.2^{2.5d_w/l_w} (1 + 10/(S_n + KC/3)^{1.5}) & (\text{聚酰胺网衣}) \\ 2.7^{2.5d_w/l_w} (1.3 + 13/(S_n + KC/3)^{1.5}) & (\text{钢制网衣}) \end{cases} \quad (11)$$

$$C_M = (0.67 + S_n) KC^{0.29 + d_w/2l_w} \quad (12)$$

公式(11)、(12)的适用范围为 $0.19 \leq S_n \leq 0.679$, $KC < 100$ 。

Xu 等(2021)分析了网片在极端波浪下荷载的变化规律, 并给出了网衣水动力系数的计算公式:

$$C_D = \begin{cases} 2.59 \times 0.997^{KC^*/(2.23S_n^2 - S_n + 0.283)} + 0.37 & \text{(聚酰胺网衣)} \\ 2.93 \times 0.997^{KC^*/(2.23S_n^2 - S_n + 0.283)} + 0.27 & \text{(钢制网衣)} \end{cases} \quad (13)$$

$$C_M = 1 \quad (14)$$

式中, $KC^* = KC / (2.23S_n^2 - S_n + 0.282)$ 。若网衣材质为聚酰胺, 公式(13)、(14)的适用范围为 $0.19 \leq S_n \leq 0.652$, $46 < KC^* < 218$ 。若网衣材质为钢, 公式(13)、(14)的适用范围为 $0.19 \leq S_n \leq 0.679$, $47 < KC^* < 363$ 。

1.1.2 面单元模型 Balash 等(2009)考虑了网衣密实度和雷诺数对网衣水动力系数的影响, 提出了网衣拖曳力系数公式。

$$C_D = \begin{cases} \left(C_D^{cyl} + \frac{C_D^{sp} \pi d_w l_w}{8D_w^2} \right) (0.12 - 0.74S_n + 8.03S_n^2) & (D_w / d_w \geq 3.14) \\ 1 + \frac{\pi d_w l_w}{8D_w^2} & (D_w / d_w < 3.14) \\ C_D^{cyl} (0.12 - 0.74S_n + 8.03S_n^2) & \end{cases} \quad (15)$$

式中, C_D^{cyl} 和 C_D^{sp} 分别代表圆柱形单元(目脚)和球形单元(网衣结节)的拖曳力系数。公式(15)的适用范围为 $0.051 \leq S_n \leq 0.235$, $Re < 5 \times 10^3$ 。

Kristiansen 等(2012)考虑了来流攻角、网衣密实度和雷诺数对网衣水动力系数的影响, 并总结了网衣拖曳力系数和升力系数公式:

$$C_D = C_D^{cyl} \frac{S_n(2 - S_n)}{2(1 - S_n)^2} (a_1 \cos \theta + a_3 \cos 3\theta) \quad (16)$$

$$C_L = \frac{\sqrt{2}}{2} C_D^{cyl} \left(\frac{S_n(2 - S_n)}{2(1 - S_n)^2} - \frac{\pi S_n(2 - S_n)}{32(1 - S_n)^2 + C_D^{cyl} S_n(2 - S_n)} \right) (b_2 \sin 2\theta + b_4 \sin 4\theta) \quad (17)$$

式中, θ 为来流攻角, 如图 1c 所示。公式(16)、(17)的适用范围为 $S_n \leq 0.5$, $32 \leq Re \leq 10000$ 。

尽管网衣密实度和雷诺数分别为描述网衣结构特征及流体属性的无量纲参数, 但在二者为常数时, 网线直径、目脚长度和来流流速(U_0)的变化也会改变网衣水动力荷载。为准确预测网衣受力, 将以上参数综合考虑是必要的(Wang *et al*, 2022)。

在实际养殖中, 海洋环境较为多变, 网衣材料和编织工艺日益更新, 采用已有的网衣水动力系数计算网衣水动力荷载会与实际产生较大差异。通过试验或者现场观测方法了解网衣水动力荷载的变化规律尤为重要。Dong 等(2019)和 Tsukrov 等(2011)研究了水

流或规则波作用下金属网衣的受力特点, 认为受网线表面粗糙度影响, 金属网衣(如: 钢网衣、铜网衣)所受拖曳力要小于聚酰胺(尼龙)网衣。然而, 在极端波浪(极限破碎波和崩破波)作用下, 网线周围的流动状态极为复杂, 波浪非线性越强, 网线材料和结节类型对网衣水动力荷载的影响越小(Xu *et al*, 2021)。

根据上述讨论可知, 网衣结构参数或流动属性的变化均会改变网衣水动力荷载。但上述公式仅适用于无生物附着网衣水动力系数的计算。然而, 在实际养殖工程中, 网衣会受到生物效应(附着生物和养殖对象)的影响, 这会导致网衣水动力荷载的显著变化。

1.2 生物效应对网衣水动力荷载的影响

在网箱养殖过程中, 网衣会受到生物效应的影响, 如附着生物及养殖鱼类的影响。为了解生物效应对网衣水动力荷载变化规律的影响, 本节将从生物附着和养殖鱼类两方面分别展开介绍。

生物附着是海洋生物的堆积, 会导致网目堵塞, 网衣水动力荷载显著增加(Fitridge *et al*, 2012)。网衣上的附着生物种类繁多, 其物理特性及分布形式均会改变网衣水动力荷载。为研究生物附着的影响, 国内外学者通常采用现场测量和物理模型试验方法。Swift 等(2006)对海洋生物附着平面网衣的受力特性进行了研究, 并通过实验室模型试验和现场测量的方式对水流作用下不同附着程度网衣的受力进行了测量。Lader 等(2015)采用模型试验的方法对附着有水螅虫的单根网线在水流作用下的受力特性的分析结果表明, 网线的受力与附着生物(水螅虫)的长度、生长时间、网线雷诺数密切相关。Gansel 等(2015)利用物理模型试验, 针对水螅虫这种附着物对水流作用下平面网衣的受力特性进行了分析, 获得了网衣受力与生物附着后的网衣密实度之间的函数关系。Bi 等(2018a)开展了现场挂片试验, 并通过控制网片的浸没水深与时长, 获得了具有不同生物附着程度的网衣。在波流水槽中开展了一系列物理模型试验, 测得了不同水流流速下, 不同附着程度网衣所受拖曳力及相应的拖曳力系数。研究表明, 附着物可使得网衣所受水流力增加至原来的 10 倍以上。此外, 不同的网线编制工艺会改变网线的表面结构与纹理, 进而影响生物附着。Dos Santos 等(2020)认为复丝网线相较于单丝网线, 其表面更为粗糙, 易于海洋生物附着, 增加网衣水动力荷载。因此, 在实际养殖过程中应注意及时对网衣进行清洗或更换(Bi *et al*, 2020b)。

网衣周围养殖鱼类的游动会影响网衣附近的流场, 改变网衣水动力荷载。当前主要采用现场观测和试验方法研究养殖对象对网衣水动力荷载的影响。Bi等(2020a)研究了鲫鱼幼苗对重力式网箱所受拖曳力的影响, 认为当鱼类迎流游动且不与网衣接触时, 鱼类存在对网箱所受拖曳力的影响很小。当流速过大时, 鱼类与网箱接触会导致网衣局部密实度增大, 网衣受力显著增加(He *et al*, 2018)。Park等(2022)分析了鱼群环游对网箱受力的影响, 认为鱼群环游会减小网箱受力。这是因为鱼群环游会产生离心力, 影响水流速度, 改变水流方向, 并增加水的混合。因此, 网箱中的湍流强度增加降低了网箱背流侧网衣所受拖曳力。

2 网衣动态响应研究

网箱养殖过程中, 网衣在波浪和水流作用下会产生变形, 导致网箱养殖体积减小, 威胁网箱安全和养殖对象的福利。因此, 研究如何减少外荷载作用下网衣的变形, 对保障网箱的养殖空间具有重要意义。本节主要对数值模拟方法进行介绍。根据计算原理可将数值模拟方法大致分为两类: 有限元方法和计算流体力学方法(computational fluid dynamics, CFD)。

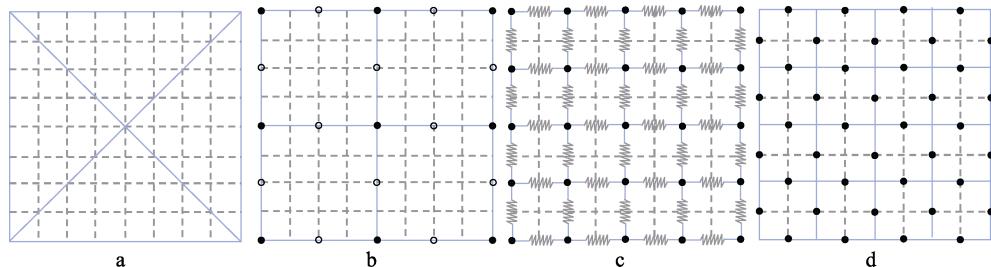


图 2 4 种有限元模型单元示意图
Fig.2 Four types of finite element model cells

a: 三角形单元, 单元通过实线表示(Priour *et al*, 1999); b: 桁架单元, 通过实线进行代替(Tsukrov *et al*, 2003);

c: 集中质量模型(Li *et al*, 2006); d: 板网单元模型(Lader *et al*, 2001)

a: Triangular element, represented by solid lines, reproduced from Priour *et al* (1999); b: Truss element, represented

by solid lines, reproduced from Tsukrov *et al* (2003); c: Lumped-mass element, reproduced from Li *et al* (2006);

d: Panel net element model, reproduced from Lader *et al* (2001).

2.1.2 桁架模型 桁架模型假设网线之间没有相互作用。当网衣通过桁架模型进行模拟时, 将网衣离散为独立的网线和结节。每个桁架单元都有一个中心节点, 并且单元可以在压力作用下屈曲。网衣在每一时间步的平衡位置可通过迭代算法进行计算, 例如: Newton-Raphson 迭代算法。在模拟过程中, 可通过一个桁架单元代替几根真实网线。为了减小单元数量, 改善计算效率, Tsukrov 等(2003)基于桁架单元提出了一致性网衣模型。图 2b 显示了一致性网衣单

2.1 有限元方法

根据单元的类型, 通过有限元方法模拟网衣系统的数值模型大致可分为 4 种(图 2): 三角形单元模型(Priour *et al*, 1999)、桁架模型(Tsukrov *et al*, 2003)、集中质量模型(Huang *et al*, 2006; Li *et al*, 2006a)和板网单元模型(Lader *et al*, 2001)。

2.1.1 三角形单元模型 Priour 等(1999)提出了三角形单元模型, 为了将网衣离散, 忽略了单元侧边是否与网线平行。该模型假设每个三角形单元的伸长量和弹性模量为定值。如图 2a 所示, 网衣通过已定义节点连接成的三角形单元建模, 这些节点用于确定网衣的平衡位置。由于网线与结节被视为圆柱和球体, 所以它们可以通过相应的单元进行代替。在求解过程中, 通过 Newton-Raphson 方法对每个时间步网衣的平衡位置进行计算。

三角形单元的边不需要与网线平行, 且可将一个单元细化为多个单元。基于上述特点, 小尺寸三角形单元可以用来模拟网衣高度变形的区域, 其余部分可通过大尺寸三角形单元进行描述。在模拟过程中, 一个三角形单元可以表示真实网衣的多个网目。因此, 三角形单元模型是一种网衣群化的方法(Li *et al*, 2006)。

元模型中具有代表性的等效桁架单元。网衣水动力荷载可通过 Morison 方程计算(Fredheim *et al*, 2001)。与此同时, 桁架模型可以对网衣结构的细节进行考虑。目前, 桁架模型已广泛应用于网箱水动力特性研究。

2.1.3 集中质量模型 集中质量模型是将网衣上的所有结节与每个网目的目脚中点都定义为集中质量点, 并通过无质量弹簧进行连接, 具体如图 2c 所示。作用在网衣上的水动力荷载可以通过 Morison 方程进行计算。通过五阶 Runge-Kutta 方法求解运动微

分方程。为了改善计算效率,可采用网衣群化的方法,将多个真实网目由具有相同几何形状和物理特性(如投影面积和水动力系数)的等效网目表示。目前,网衣群化方法已广泛用于研究水产养殖网箱的水动力特性(Zhao *et al*, 2007b; Xu *et al*, 2012; Hou *et al*, 2017; Yang *et al*, 2020)。

通过集中质量法可以对网箱变形及其运动响应进行求解。Li 等(2006)基于集中质量法,提出了水流作用下三维网衣的动力学模型。在不同流速下,计算了配有不同重量沉子重力式网箱的网衣变形和水动力荷载。Zhao 等(2007b)将刚体运动学和集中质量法结合,建立了重力式网箱的数值模型。计算了重力式网箱在纯流、纯波和波流联合作用下的运动、网衣变形和系泊力。Chen 等(2009)建立了波浪中带网格系泊系统的网箱数值模型。随着网格下潜深度的增加,浮架的水平运动幅度明显减小,而垂直运动幅度变化不大。Dong 等(2010)分析了重力式网箱在波浪中的水动力响应,发现系泊力随着波浪频率的增加而减小。Zhao 等(2010)计算了重力式网箱在漂浮和淹没状态下的系泊力和网箱运动。结果表明,网箱淹没后,系泊力与网箱运动响应均明显减小。Xu 等(2013)建立了网箱和网格系泊系统在波浪和水流条件下的数值模型。发现在漂浮状态下,锚绳上的最大张力随着波陡的增加而增加。在淹没条件下,波陡对锚绳上的最大张力没有显著影响。Zhao 等(2013a)建立了箱形网箱的数学模型,模拟了箱形网在纯波浪和水流中的系泊力和运动响应。在纯波浪和水流作用下,圆柱形网箱比箱形网箱更稳定。

2.1.4 板网单元模型 板网单元模型是将网衣分为多个面板单元,相邻面板单元通过节点连接,具体如图 2d 所示。为了提高计算效率,可通过一个虚拟面板单元代替多个真实网目。模拟过程中,节点可进行三维运动。面板单元的结构特征与非线性弹簧相类似。作用在任意一个网板单元上的力会均匀分布到相邻单元节点上,同时质量也均匀分布在对应节点上。

对比以上 4 种有限元方法可知,四者的主要区别在于离散单元类型不同。三角形和板网单元模型需要将网衣离散为小尺寸的面单元,而集中质量和桁架单元模型则是将网衣离散为质量点与杆单元。通过上述有限元方法均可考虑网衣的运动与变形,并可采用网目群化减少计算量。然而,上述模型仅通过流速衰减系数来近似考虑网衣周围的流速变化。由于网箱形状、数量和网箱间距的影响,网箱内部及网箱之间的流速分布并不均匀(Bi *et al*, 2018b)。为准确描述网衣的动态响应,需要考虑网衣周围的实际流场变化。

2.2 计算流体力学方法

与有限元模拟方法不同,通过计算流体力学方法获取作用在网衣上的水动力荷载时必须考虑流体粘性的影响,且控制方程为 Navier-Stokes 方程。一般通过离散方法,如有限体积法(finite volume method, FVM),对控制方程进行离散。通过求解离散化的控制方程,可以得到流体的速度场与压力场。

为了提高计算效率,一般采用多孔介质模型模拟网衣。多孔介质模型是一个假想的模型,它在多孔介质区域结合了一个根据经验假设为主的流动阻力,通过合理设置多孔介质系数,使得多孔介质具有与网衣相同的阻流效果,得到网衣周围的流场情况(Bi *et al*, 2014a; Zhao *et al*, 2013a)。在计算过程中,通过二阶精度的有限体积方法对雷诺平均的 Navier-Stokes (RANS)方程离散。采用分离式解法中的压力修正法计算速度场与压力场(Patankar *et al*, 1983),并通过湍流模型考虑其背后的湍流机理。目前而言,学者们选取的湍流模型都是基于 Boussinesq 假设的湍流模型,如 k-Epsilon、k-Omega 等(Launders *et al*, 1983)。

多孔介质模型的设置关键在于多孔介质系数的选取,该系数可通过多种方法确定。Patankar 等(1983)使用归一化的最小平方误差来寻找最佳多孔介质系数。Zhao 等(2013c)根据试验数据,通过最小二乘法获取了网衣多孔介质系数。尽管通过多孔介质模型可以考虑网衣周围的流场特性,但是该方法无法精细考虑网线周围的流场变化以及网线的运动(Martin *et al*, 2020)。

为了解决计算流体力学方法求解网衣水动力问题存在的不足,学者们提出有限元方法和计算流体力学相结合的流固耦合模型。通过多孔介质模型考虑网衣周围的流场,并采用有限元模型对网衣变形进行模拟。Bi 等(2014b)将集中质量法与多孔介质模型相结合,建立了水流作用下柔性网衣的数值模型。与试验结果相比,该模型可以近似地模拟网衣变形及网衣周围的流场特性。Chen 等(2017)对上述模型进行完善,考虑了网衣与流体间的相互作用,可模拟水流作用下柔性网衣的变形。在此基础上,通过刚体运动求解器对浮架的运动响应进行计算,并与上述流固耦合模型相结合,实现了波浪和水流作用下重力式网箱的运动响应的近似估计(Chen *et al*, 2018)。Tang 等(2017)基于计算流体力学方法,建立了拖网的三维数值模型,并通过大变形非线性结构模型(LDNS)对拖网在水流中的结构变形进行了分析。Martin 等(2020)开发了一种拉格朗日方法,用在基于浸没边界法的欧拉流体模型中,对网衣在波浪作用下的运动响应进行了模拟。

总的来说, 计算流体力学方法可通过多孔介质模型考虑网衣周围的流场, 但在处理网线周围的精细化流场时存在不足。将有限元方法与计算流体力学相结合的流固耦合模型, 既有效地考虑了网衣变形, 又兼顾了流场特性的分析, 但模型网格数量一般在千万量级, 导致计算效率较低。

3 网衣周围波流场研究

网衣周围流场和波浪场的变化会直接影响养殖网箱内外的物质运输和鱼类游动。当流速过低时, 网箱内残余饵料和鱼类排泄物等有害物质无法及时从设施中清除, 致网箱内水质变差, 影响鱼类健康(Zhao et al, 2013a)。相反, 过高的流速会造成鱼类不适, 不

利于它们的存活与生长。同时, 极端波浪与网箱相互作用会产生越浪, 导致鱼类逃逸(Bi et al, 2014a)。因此, 分析渔网周围的流场和波浪场是确保鱼类福利、减少经济损失的有效途径。为系统了解网衣周围的波流场特性, 改进养殖网箱的设计与管理, 本节从网衣的尾流效应、流场和波浪场三方面进行综述。

3.1 网衣的尾流效应

尾流效应是网衣流场分析中的一个重要且复杂的机理。网衣下游的尾流区是流速扰动区域(通常是湍流)(Zhao et al, 2013a)。研究网箱网衣系统的尾流效应时, 可按照影响范围, 将网衣的尾流效应分为3种: 网线之间、网衣之间、网箱之间的尾流效应(图3)。

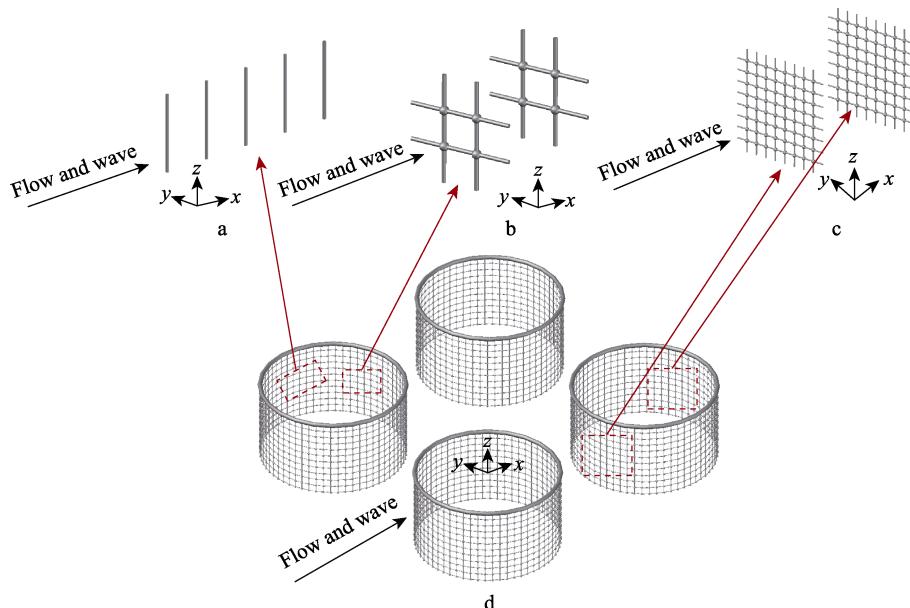


图3 网衣系统的尾流效应
Fig.3 Wake effect of the net system

a: 网线; b: 网目; c: 网衣; d: 网箱 a: Twines, b: Mesh, c: Nets, d: Net cages

3.1.1 网线之间的尾流效应 网线之间的尾流效应存在于网目目脚之间。由于目脚结构可简化为圆柱结构, 根据这一假设, 可采用 Blevins(1990)提出二维圆柱尾流流速计算公式考虑网线下游的流速衰减。

$$\frac{U_{down,t}}{U} = 1 - 1.02 \sqrt{\frac{C_D}{6 + \frac{x}{d_w}}} \exp \left(- \frac{\left(\frac{y}{d_w} \right)^2}{0.0767 C_D \left(6 + \frac{x}{d_w} \right)} \right) \quad (18)$$

式中, $U_{down,t}$ 为网线下游流速。

Fredheim(2005)在 Blevins(1990)研究基础上考虑

多个圆柱对流速衰减的影响, 并提出相应计算公式:

$$\frac{U_N}{U} = 1 - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{U_i}{U} 1.02 \exp \left(- \frac{\left(\frac{y_N - y_i}{d_w} \right)^2}{0.0767 C_D \left(\frac{x_N - x}{d_w} \right)} \right) \sqrt{\frac{C_D}{6 + \frac{x_N - x}{d_w}}} \quad (19)$$

式中, U_i 为圆柱 i 处时间平均的流速, (x_i, y_i) 对应圆柱 i 的坐标(其中, $i=1, 2, 3 \cdots N$)。参考公式(18)和(19)可知, 当网线下游的位置与上游网线距离远大于网线直径时, 网线之间的尾流效应几乎可以忽略。

上述研究所针对的是单个网线之间的尾流效应。在养殖工程中, 网衣通常是由2个交叉网线组成的十

字型单元构成(Osaka *et al*, 1983)。同时,杆件相互垂直排布产生的交互作用使得十字型单元周围产生了明显的“二次流”(Fox, 1991)。因此,了解圆柱十字单元的尾流效应有利于理解网衣周围的流态。近年来,随着计算机计算性能的提升,学者们通过 CFD 对圆柱十字单元周围的流场展开了研究,并分析了网目形状、雷诺数、密实度对单元尾流的影响(Bi *et al*, 2017a; Tang *et al*, 2021)。

尽管网衣是由网线和圆柱十字型单元组成,但网衣的尾流效应并非上述单元尾流效应的叠加(Wang *et al*, 2021)。因此,需要对网衣的尾流特性开展研究。

3.1.2 网衣之间的尾流效应 网衣之间的尾流效

应通常表示为同一网箱中网衣之间的相互作用。对于重力式网箱而言,几乎一半的网衣都会受到网衣之间尾流效应的影响。在研究过程中,一般通过流速衰减因子(r)考虑网衣之间的尾流效应。位于尾流区域中的网衣对应的流速可通过下式计算:

$$U_{\text{down, n}} = rU_{\text{up, n}} \quad (20)$$

式中, $U_{\text{up, n}}$ 、 $U_{\text{down, n}}$ 为网衣上、下游的流速, r 为流速衰减因子。现有研究中的流速衰减因子见表 1。

根据现有的网衣下游流速衰减因子计算公式可知,现有模型通常考虑的是网衣密实度及雷诺数的影响。对于其他参数(例如来流方向、网线直径、材料、结节类型等)对流速衰减的影响并未予以分析。因此,将来的研究应关注多参数与网衣尾流效应的关系。

表 1 网衣下游流速衰减因子

Tab.1 Flow reduction factors of the nets

模型 Model	流速衰减因子 Flow reduction factors	网衣密实度 S_n	雷诺数 Re	参考文献 Reference
R1	0.69	0.128~0.223	170~1 438	Zhan <i>et al</i> , 2006
R2	1~0.46 C_D	0.13~0.32	1 400~1 800	He <i>et al</i> , 2018; Kristiansen <i>et al</i> , 2015; Shen <i>et al</i> , 2018
R3	0.85	0.20~0.22	18~60	Huang <i>et al</i> , 2006; Xu <i>et al</i> , 2013
R4	0.8	0.225	72~936	Li <i>et al</i> , 2006; Zhao <i>et al</i> , 2007a
R5	0.873	0.081~0.238	89.6~1 638	DeCew <i>et al</i> , 2010

3.1.3 网箱间的尾流效应 网箱之间的尾流效应通常为网箱阵列中网箱之间的相互影响。由于网衣对水流的阻碍作用,网箱阵列中位于下游的网箱周围流速要明显高于上游网箱。不同于网线及网衣之间的尾流效应,网箱与网箱间的相互作用更为复杂(Lader *et al*, 2005)。由于网箱形状、数量、网箱间距的影响,网箱之间的流速分布十分复杂(Bi *et al*, 2018b)。因此,通过单一的流速衰减因子难以准确描绘网箱间复杂的流场变化。

总的来说,研究网箱的尾流效应是了解网箱周围流场的关键点之一。所以,结合现有研究并考虑新型网箱结构及多参数影响,分析高精度流场是进一步掌握网箱尾流特性、推动网箱养殖发展的基础。

3.2 网衣周围的流场与波浪场

目前,学者们通过试验和数值模拟方法对网衣周围的流场进行了研究。Bi 等(2013)进行了一系列物理模型试验,以研究在水流中网衣下游的流速衰减。通过粒子图像测速(PIV)技术和声学多普勒测速仪(ADV)获得了网衣下游的流速分布。研究发现,网衣下游流速明显降低,且降低幅度随网衣密实度的增加

而增大。随着网板与垂直方向之间倾角的增大,流速的衰减逐渐增大。Zhao 等(2013b)通过计算流体力学方法,建立了网衣的三维数值模型,并模拟了水流作用下网衣周围的流场,结果显示,当网衣倾角大于 45° 时,网衣周围流场会产生明显变化。随着网衣数量沿水流方向增加,下游流速会逐渐衰减。Zhao 等(2013c)建立了重力式网箱的三维数值模型,并模拟了水流作用下网箱周围的流场。研究表明,当 2 个网箱沿水流方向布置时,网箱间距的变化不会明显影响网箱内部的流速衰减幅度。当网箱沿水流方向逐渐增加时,下游流速衰减幅度逐渐增大,但下游网箱的存在不会影响上游网箱内部的流场。Bi 等(2014a)将有限元方法与计算流体力学方法相结合,建立了水流作用下柔性网衣的数值模型,并研究了单片网衣和两片网衣周围的流场。结果显示,由于网衣孔隙率较大,使得单片柔性网衣周围的水流方向变化并不明显。与单片网衣相比,两片网衣周围水流流向变化更为明显。同时,网衣遮蔽效应随着沿水流方向网衣数量的增加而增大。Liu 等(2021)研究了半潜式渔场平台的流场特性,数据显示,网衣的存在扩大了平台内部的低流速区域,并且随着网衣密实度的增加,平台内部的流速

衰减越明显。Bi等(2020a)通过试验方法研究了养殖鱼群对网箱内外流场的影响,结果显示,鱼类的运动增大了网箱内部及网箱下游的流场变化,流体的湍流强度随着鱼类养殖密度的增大而增大。

由于网衣的存在对波浪的传播具有阻挡和耗散作用,因此,需要对网衣周围的波浪场展开研究。Zhao等(2014)研究了网衣与波浪间的相互作用,发现网衣密实度的变化对波的传播几乎没有影响。随着波高的增加,波浪透射系数保持不变。波浪透射系数随波长的增加而增加。Bi等(2015)通过物理模型试验研究了波浪作用下网箱的阻尼效应,发现受网箱影响,网箱内部及其周围的波浪场有明显的三维效应。对于网箱群组而言,随着波周期增大,波浪透射系数逐渐增大,且网箱数量越多,波浪透射系数增加越明显。网箱对波浪的阻尼效应随着网箱数目的增长而增长。与网箱下游相比,网箱内部的波浪透射系数更大。网箱下游的波浪透射系数随着网箱间距的增大而减小。Zhao等(2016)研究了直列式网箱群组在波浪作用下,网箱内部及其周围的波浪场,结果显示,随着网箱数量沿波浪传播方向逐渐增加,网箱下游的波浪透射系数逐渐减小。

在实际养殖过程中,网衣上的附着生物及网箱内的养殖对象均会对网衣周围的波流场产生影响。首先,附着生物会导致网目堵塞,降低网箱内外水交换速率、增加网箱内部及下游的流速衰减幅度(Gansel等,2012)。毕春伟(2016)建立多孔介质模型模拟生物附着网衣,对水流作用下原型尺度的网箱内外流场特性开展了研究。与无附着物的工况相比,网箱内部和下游流速的衰减幅度随着网衣被附着程度的增加而增大,网箱内部流场分布的不均匀性也会逐渐增大。在此基础上,Bi等(2018b)对潮流作用下网箱阵列(以2×4的网箱阵列为例)流场特性进行了模拟,总体而言,生物附着程度越大,对网箱周围潮流场的影响越明显。与未考虑生物附着影响的结果相比较,附着物的存在使得网箱内外波浪场发生明显改变。网衣被附着程度越严重,网箱阵列对波浪场的影响也就越大。波浪传播穿过网箱阵列后,由于网箱及附着物的阻尼作用,波峰和波谷都有所消减(Bi等,2017b)。其次,网箱内养殖鱼类的存在与游动会减小水流流速并改变水流方向(Klebert等,2013)。鱼类游动过程中,鱼体和鱼鳍的摆动会促进鱼类背后局部射流和漩涡的产生,从而影响网箱内部及周围的流场(Masaló等,2016)。由于单条鱼类对流场影响的程度相对有限,人们通常研究鱼群对网衣周围流场的作用。一些鱼类倾向于形成一个圆环状的鱼群,并以环形模式游

泳。为了保持环形模式,鱼类必然会有朝向网箱中心的向心力使得网箱表面的水体向中间汇聚。然而,这种向心力与网箱外部的水体平衡,导致水流方向发生偏转(Gansel等,2014)。

4 讨论与展望

研究网衣系统的水动力特性对于养殖设施的结构设计与安全评估至关重要。本综述介绍了网衣水动力特性的研究进展,为柔性网衣结构水动力特性研究的发展提供建议和对策。

4.1 网衣水动力荷载研究

为了确保网箱养殖的结构安全,准确预测网衣上的水动力荷载一直是人们关注的焦点。根据现有研究,求解网衣水动力荷载的主要方法是通过经验公式计算,其中,水动力系数的选取决定了计算结果的准确性。到目前为止,国内外学者拟合的水动力系数经验公式主要考虑了网衣结构参数、流体流动属性和生物效应的影响。但这些公式所考虑的影响因素是有限的。随着网衣材料和编织工艺的日益更新,网衣基本参数的变化会影响网衣的力学特征(Zhou等,2015)。在复杂环境条件下(如:孤立波、聚焦波和极限破碎波),网衣水动力荷载会产生强非线性(Xu等,2021)。同时,柔性网衣在水流和波浪作用下会产生变形,增加网衣水动力荷载的计算难度。多类附着生物及养殖对象对网衣水动力荷载产生的影响也应予以考虑。

在今后的研究工作中,可以通过物理模型试验建立网衣水动力系数的数据库。同时,采用智能化算法,如数字孪生技术等,构建预测模型,生成多种因素与网衣水动力系数的映射关系(连栗楷等,2022)。此外,数据库与算法应实时更新,用以提升网衣水动力荷载的计算精度。

4.2 网衣动态响应研究

对于网衣动态响应研究的数值方法主要有两种,有限元方法和计算流体力学方法。在实际应用过程中,必须衡量每种方法的优缺点,使用现有的有限元模型求解网衣动态响应时,可以通过网目群化方法提升计算效率,但有限元模型通常采用流速衰减系数近似考虑网衣周围的流速变化,这会导致计算结果与网衣实际变形产生差异。在计算流体力学方法中,可以通过多孔介质模型对网衣周围的波流场进行模拟,并考虑生物附着对网衣水动力特性的影响,但该模型无法精细捕捉网线周围的流场。尽管将有限元方法与计算流体力学方法相结合的流固耦合模型极大地推进

了网衣的数值模拟进程, 但通过该方法建立的数值模型网格一般在千万量级, 导致计算效率较低。

在未来研究中, 需要对柔性网衣的流固耦合问题开展深入研究, 重点关注网衣与流体之间的双向耦合、探索直接数值模拟方法。在考虑计算精度的同时, 应选取适宜的算法, 如浸没边界法等, 并开展并行计算方法的开发以提升计算效率。

4.3 网衣周围波流场研究

网衣周围的波流场决定了网箱内外的水交换速率, 直接影响了水中营养物质、溶解氧、废物等的分布。然而, 当前的大多数研究主要关注于网衣周围的流场。对于深远海网箱养殖, 网箱需要面对恶劣的波浪条件, 所以了解网衣周围的波浪场是促进网箱养殖发展的重要支撑。同时, 为抵抗极端海况, 近年来大型自动化钢结构养殖平台得到了越来越多的关注, 平台框架与网衣间的交互作用会显著改变周围的流场与波浪场, 分析复杂结构引起的特殊流场现象是未来需要面临的一大挑战。此外, 对于鱼群效应和附着生物带来的波流场变化也应持续研究(Bi *et al.*, 2020a)。

随着水产养殖的不断发展, 了解极端波况下网衣周围的波浪场变化是推广网箱养殖适用范围的基础。同时, 在后续的研究中, 考虑生物附着种类、附着密度、养殖鱼种、鱼类尺寸、数量、鱼群游动速度和游动状态等因素对网箱内流场的影响更利于监测鱼类的健康、降低鱼类患病风险、保证网箱养殖的可持续发展。

参 考 文 献

- BALASH C, COLBOURNE B, BOSE N, *et al.* Aquaculture net drag force and added mass. *Aquacultural Engineering*, 2009, 41(1): 14–21
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net. *Aquacultural Engineering*, 2013, 57: 71–81
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* A numerical analysis on the hydrodynamic characteristics of net cages using coupled fluid-structure interaction model. *Aquacultural Engineering*, 2014a, 59: 1–12
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* Numerical simulation of the interaction between flow and flexible nets. *Journal of Fluids and Structures*, 2014b, 45: 180–201
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* Experimental and numerical investigation on the damping effect of net cages in waves. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 55: 122–138
- BI C W. Investigation on the characteristics of flow field and wave propagation inside and around the aquaculture net cage. Doctoral Dissertation of Dalian University of Technology, 2016 [毕春伟. 海上养殖网箱内部及周围波流场特性研究. 大连理工大学博士学位论文, 2016]
- BI C W, BALASH C, MATSUBARA S, *et al.* Effects of cylindrical cruciform patterns on fluid flow and drag as determined by CFD models. *Ocean Engineering*, 2017a, 135: 28–38
- BI C, ZHAO Y, DONG G, *et al.* Numerical study on wave attenuation inside and around a square array of biofouled net cages. *Aquacultural Engineering*, 2017b, 78: 180–189
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* Drag on and flow through the hydroid-fouled nets in currents. *Ocean Engineering*, 2018a, 161: 195–204
- BI C W, XU T J. Numerical study on the flow field around a fish farm in tidal current. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2018b, 18(5): 705–716
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H. Experimental study on the effects of farmed fish on the hydrodynamic characteristics of the net cage. *Aquaculture*, 2020a, 524: 735239
- BI C W, CHEN Q P, ZHAO Y P, *et al.* Experimental investigation on the hydrodynamic performance of plane nets fouled by hydroids in waves. *Ocean Engineering*, 2020b, 213: 107839
- BLEVINS R D. *Flow-induced vibration*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
- BREBBIA C A, WALKER S. Dynamic analysis of off-shore structures. *Applied Ocean Research*, 1981, 3(4): 205
- CHEN C P, LI Y C, ZHAO Y P, *et al.* Numerical analysis on the effects of submerged depth of the grid and direction of incident wave on gravity cage. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(2): 233–250
- CHEN H, CHRISTENSEN E D. Development of a numerical model for fluid-structure interaction analysis of flow through and around an aquaculture net cage. *Ocean Engineering*, 2017, 142: 597–615
- CHEN H, CHRISTENSEN E. Simulating the hydrodynamic response of a floater-net system in current and waves. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 79: 50–75
- CHOO Y L, CASARELLA M J. Hydrodynamic resistance of towed cables. *Journal of Hydraulics*, 1971, 5(4): 126–131
- DECEW J, TSUKROV I, RISSO A, *et al.* Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(2): 38–45
- DONG G, TANG M, XU T, *et al.* Experimental analysis of the hydrodynamic force on the net panel in wave. *Applied Ocean Research*, 2019, 87: 233–246
- DONG G, XU T, ZHAO Y, *et al.* Numerical simulation of hydrodynamic behavior of gravity cage in irregular waves. *Aquacultural Engineering*, 2010, 42(2): 90–101
- DONG S, YOU X, HU F, *et al.* Effects of wave forces on knotless polyethylene and chain-link wire netting panels for marine aquaculture cages. *Ocean Engineering*, 2020, 207:

- 107368
- DOS SANTOS A P, HAGE SETA J H, KUHNEN V V, *et al.* Antifouling alternatives for aquaculture in tropical waters of the Atlantic Ocean. *Aquaculture Reports*, 2020, 18: 100477
- FAO. The state of the world series of the Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022
- FITRIDGE I, DEMPSTER T, GUENTHER J, *et al.* The impact and control of biofouling in marine aquaculture: A review. *Biofouling*, 2012, 28(7): 649–669
- FOX. Wave characteristics of two circular cylinders arranged perpendicular to each other. *Journal of Fluids Engineering*, 1991, 113(1): 45–50
- FREDHEIM A, FALTINSEN O M. A numerical model for the fluid structure interaction of a three-dimensional net structure. *Contributions on the Theory of Fishing Gears and Related Marine Systems*, 2001, 2
- FREDHEIM A. Current forces on net structure. *Fakultet for Ingeniørvitenskap og Teknologi*, 2005
- FREDHEIM F. Hydroelastic analysis of a fishing net in steady inflow conditions. *Proceedings of the 3rd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*. University of Oxford Press, 2003, 1–10
- GANSEL L C, MCCLIMANS T A, MYRHAUG D. Average flow inside and around fish cages with and without fouling in a uniform flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2012, 134(4): 40–49
- GANSEL L C, PLEW D R, ENDRESEN P C, *et al.* Drag of clean and fouled net panels: Measurements and parameterization of fouling. *PLoS One*, 2015, 10(7): e131051
- GANSEL L C, RACKEBRANDT S, OPPEDAL F, *et al.* Flow fields inside stocked fish cages and the near environment. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136(3): 031201
- HE Z, FALTINSEN O M, FREDHEIM A, *et al.* The influence of fish on the mooring loads of a floating net cage. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 76: 384–395
- HOU H M, XU T J, DONG G H, *et al.* Time-dependent reliability analysis of mooring lines for fish cage under corrosion effect. *Aquacultural Engineering*, 2017, 77: 42–52
- HUANG C, TANG H, LIU J, *et al.* Dynamical analysis of net cage structures for marine aquaculture: Numerical simulation and model testing. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(3): 258–270
- KAWAKAMI T. The theory of designing and testing fishing nets in model. In: *Modern Fishing Gear of the World* vol. 2, Fishing News Books Ltd., London, 1964, 471–489
- KLEBERT P, LADER P, GANSEL L, *et al.* Hydrodynamic interactions on net panel and aquaculture fish cages: A review. *Ocean Engineering*, 2013, 58(4): 260–274
- KRISTIANSEN T, FALTINSEN O M. Modelling of current loads on aquaculture net cages. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 34: 218–235
- LADER P F, ENERHAUG B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(1): 79–84
- LADER P F, FREDHEIM A, LIEN E. Dynamic behaviour of 3D nets exposed to waves and current. *20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2001
- LADER P, FREDRIKSSON D W, GUENTHER J, *et al.* Drag on hydrodynamic-fouled nets: An experimental approach. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(3): 369–389
- LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows. *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, 1983: 96–116
- LI Y, ZHAO Y, GUI F, *et al.* Numerical analysis of the effects of sinker weight on the hydrodynamics behaviour of gravity cage net in uniform flow. *Journal of Hydrodynamics*, 2006a, 18(3 Suppl.): 77–83
- LI Y, ZHAO Y, GUI F, *et al.* Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of submerged plane nets in current. *Ocean Engineering*, 2006b, 33(17/18): 2352–2368
- LIAN L K, ZHAO Y P, BI C W, *et al.* Research on the damage detection method of the plane fishing net based on the digital twin technology. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 40–46 [连栗楷, 赵云鹏, 毕春伟, 等. 基于数字孪生技术的平面渔网破损检测方法研究. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 40–46]
- LIU H, BI C, XU Z, *et al.* Hydrodynamic assessment of a semi-submersible aquaculture platform in uniform fluid environment. *Ocean Engineering*, 2021, 237: 109656
- LØLAND G. Current forces on and flow through fish farms. *Doctoral Dissertation of University of Trondheim*, 1991
- MARTIN T, TSARAU A, BIHS H, *et al.* A numerical framework for modelling the dynamics of open ocean aquaculture structures in viscous fluids. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 1–28
- MASALÓ I, OCA J. Influence of fish swimming on the flow pattern of circular tanks. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 84–95
- MORISON J R. The force exerted by surface waves on piles. *Petroleum Trans Aime*, 1950, 189
- OSAKA H, YAMADA H, NAKAMURA I, *et al.* The structure of a turbulent wake behind a cruciform circular cylinder: 2nd Report, the streamwise development of turbulent flow field. *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers*, 1983, 26(214): 521–528
- PARK S, ZHOU J, DONG S, *et al.* Characteristics of the flow field inside and around a square fish cage considering the circular swimming pattern of a farmed fish school: Laboratory experiments and field observations. *Ocean Engineering*, 2022, 261: 112097
- PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, 1983, 54–73

- PRIOUR D. Calculation of net shapes by the finite element method with triangular elements. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 1999, 15(10): 755–763
- SHEN Y, GRECO M, FALTINSEN O M, et al. Numerical and experimental investigations on mooring loads of a marine fish farm in waves and current. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 79: 115–136
- SIEVERS M, KORSØEN Ø, WARREN-MYERS F, et al. Submerged cage aquaculture of marine fish: A review of the biological challenges and opportunities. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 14(1): 106–119
- SWIFT M R, FREDRIKSSON D W, UNREIN A, et al. Drag force acting on biofouled net panels. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(3): 292–299
- TANG M F, DONG G H, XU T J, et al. Large-eddy simulations of flow past cruciform circular cylinders in subcritical Reynolds numbers. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 1–18
- TANG M F, DONG G H, XU T J, et al. Numerical simulation of the drag force on the trawl net. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, 17(6): 1219–1230
- TSUKROV I, DRACH A, DECEW J, et al. Characterization of geometry and normal drag coefficients of copper nets. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17): 1979–1988
- TSUKROV I, EROSHKIN O, FREDRIKSSON D, et al. Finite element modeling of net panels using a consistent net element. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251–270
- 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. *Applied Ocean Research*, 2022, 118: 102965
- WANG G, MARTIN T, HUANG L, et al. Modelling the flow around and wake behind net panels using large eddy simulations. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109846
- XU T J, DONG G H, ZHAO Y P, et al. Numerical investigation of the hydrodynamic behaviors of multiple net cages in waves. *Aquacultural Engineering*, 2012, 48: 6–18
- XU T J, ZHAO Y P, DONG G H, et al. Analysis of hydrodynamic behavior of a submersible net cage and mooring system in waves and current. *Applied Ocean Research*, 2013, 42: 155–167
- XU T, DONG G, TANG M, et al. Experimental analysis of hydrodynamic forces on net panel in extreme waves. *Applied Ocean Research*, 2021, 107: 102495
- YANG R Y, TANG H J, HUANG C C, et al. Numerical modeling of the mooring system failure of an aquaculture net cage system under waves and currents. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(4): 1396–1410
- ZHAN J M, JIA X P, LI Y S, et al. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(1): 91–101
- ZHAO Y P. Numerical investigation on hydrodynamic behavior of deep water gravity cage. Doctoral Dissertation of Dalian University of Technology, 2007 [赵云鹏. 深水重力式网箱水动力特性数值模拟研究. 大连理工大学博士研究生学位论文, 2007]
- ZHAO Y P, LI Y C, DONG G H, et al. A numerical study on dynamic properties of the gravity cage in combined wave-current flow. *Ocean Engineering*, 2007a, 34(17/18): 2350–2363
- ZHAO Y P, LI Y C, DONG G H, et al. Numerical simulation of hydrodynamic behaviors of gravity cage in waves. *China Ocean Engineering*, 2007b, 21(2): 225–238
- ZHAO Y P, LI Y C, DONG G H, et al. An experimental and numerical study of hydrodynamic characteristics of submerged flexible plane nets in waves. *Aquacultural Engineering*, 2008, 38(1): 16–25
- ZHAO Y P, LI Y C, DONG G H, et al. Numerical simulation of hydrodynamic behaviors of gravity cage in current and waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2009, 19(2): 97–107
- ZHAO Y P, XU T J, DONG G H, et al. Numerical simulation of a submerged gravity cage with the frame anchor system in irregular waves. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22: 416–420
- ZHAO Y P, BI C W, DONG G H, et al. Numerical simulation of the flow around fishing plane nets using the porous media model. *Ocean Engineering*, 2013a, 62: 25–37
- ZHAO Y P, BI C W, DONG G H, et al. Numerical simulation of the flow field inside and around gravity cages. *Aquacultural Engineering*, 2013b, 52: 1–13
- ZHAO Y P, GUI F K, XU T J, et al. Numerical analysis of dynamic behavior of a box-shaped net cage in pure waves and current. *Applied Ocean Research*, 2013c, 39: 158–167
- ZHAO Y P, BI C W, LIU Y X, et al. Numerical simulation of interaction between waves and net panel using porous media model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2014, 8(1): 116–126
- ZHAO Y P, BI C W, DONG G H. A numerical study on wave propagating through in-line net cages. In: ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2016
- ZHOU C, XU L, HU F, et al. Hydrodynamic characteristics of knotless nylon netting normal to free stream and effect of inclination. *Ocean Engineering*, 2015, 110: 89–97
- ZHOU Y Q, XU L X, LI Y W, et al. Mechanics of fishing gear. Beijing: Science Press, 2017 [周应祺, 许柳雄, 李玉伟, 等. 渔具力学. 北京: 科学出版社, 2017]

Research Process for the Hydrodynamic Characteristics of Flexible Net Structures for Offshore Aquaculture

LING Aijun¹, LIANG Yuanhua¹, ZHAO Dehui³, FAN Zhongqi², ZHAO Yunpeng^{2①}

(1. Offshore Engineering Technology Center of China Classification Society, Tianjin 300457, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Dalian Changhai County Marine and Fishery Comprehensive Administrative Law Enforcement Team, Dalian 116024, China)

Abstract With the increase in global population, the demand for aquatic products rises annually. As a sustainable industry, aquaculture offers a promising solution to address the growing demand for fish products. Meanwhile, intensifying and expanding sustainable aquaculture is essential for achieving the United Nations' global goal of the Decade of Action. Cage culture is a typical aquaculture method used globally. This culture method has the following advantages: (I) Highly researched with a long history: cage culture has been in use since the 1970s. Cultivating high-value aquatic products through cage culture has become indispensable in aquaculture. (II) The development prospects of cage culture are broad and include realization of the comprehensive breeding of different species. In the integrated multi-nutritive aquaculture (IMTA) system, cage culture enables a multi-species combination in which uneaten feed and nutrients from the excreted waste of one breeding species are used as food for other breeding species, thereby reducing nutrients released into the environment and increasing overall productivity. Net cage culture in shallow waters has grown exponentially in the past few decades. However, due to the limited space in nearshore areas and an increasing number of countries paying attention to the environmental problems caused by cage culture, the method has gradually shifted to deeper waters to ensure food security and safety. At the same time, alleviating environmental stress caused by nearshore cage culture and the expansion of the food production space are inevitable. Compared with nearshore aquaculture, the environmental conditions of offshore aquaculture are more complex, and the net cages are inevitably subjected to harsh sea conditions. To achieve the safe production of offshore aquaculture, it is crucial to study wind and wave resistance technology for use in culture net cages. As an essential part of net cages, the netting system is mainly used to maintain breeding space, protect the breeding species, prevent them from escaping, and protect them from predators. In the flow and wave field, the netting system bears most of the load on the farming facilities. Compared with other traditional marine structures, the nets have the mechanical characteristics of small scale and high flexibility. Under external force, the nets show large displacement and massive deformation, reducing breeding space and increasing the likelihood of damage to breeding species due to crowding. At the same time, the nets change the flow and wave field around the facility, affecting the distribution of the remaining bait, breeding species' excrement, and dissolved oxygen in the water. Currently, the lack of analysis technology for nets is a limitation in offshore cage culture engineering, which restricts the large-scale development of offshore cages. Therefore, research on the hydrodynamic characteristics of nets is vital for developing offshore cage culture. This study introduced primary methods for calculating the netting hydrodynamic loads and their applicability. Simultaneously, the predominant modeling techniques in the numerical calculation of the netting dynamic response were summarized and analyzed. Furthermore, a systematic review of studies relating to the wave

① Corresponding author: ZHAO Yunpeng, E-mail: ypzhao@dlut.edu.cn

flow field around net mesh was conducted. Finally, the current hot topics in the research of netting hydrodynamic characteristics were reviewed to provide a reference for designing and optimizing cages. Considering the influence of various parameters on the hydrodynamic loads on the nets is an effective way to improve the prediction accuracy for the loads, which is also a critical area of research that requires further investment. In order to restore the real force characteristics of nets, a database of the netting hydrodynamic coefficients should be established through experiments. Intelligent algorithms, such as digital twin technology, are used to construct prediction models and generate mapping relationships between multiple factors and the hydrodynamic coefficients of the nets. Moreover, databases and algorithms should be updated regularly to improve the accuracy of calculating the netting hydrodynamic load. For the dynamic response of the nets, the fluid-structure coupling of the flexible nets should be studied intensively in the future, focusing on the two-way coupling between the nets and the fluid and exploring direct numerical simulation methods. Meanwhile, considering computational accuracy, suitable algorithms, such as the submerged boundary method, should be selected, and parallel computational methods should be developed to improve computational efficiency. In terms of the flow and wave field around the nets, further research should be conducted to determine the effects of extreme waves, biofouling, fouling density, cultured fish species, fish size, fish number, fish swimming speed, and fish swimming status on the flow field in the net cages, which will be conducive to monitoring the health of fish, reducing the risk of fish diseases, and ensuring the sustainable development of cage culture. This study provides a reference for developing net hydrodynamic analysis for digitalization and precision. It also provides more information for the sustainable development of aquaculture.

Key words Offshore cage aquaculture; Net; Hydrodynamic characteristics; Finite element method; Computational fluid dynamics