

DOI: 10.12264/JFSC2024-0049

## 渔具水动力数值模拟研究进展

李非<sup>1</sup>, 花传祥<sup>1,2</sup>, 宋利明<sup>1,2</sup>, 朱清澄<sup>1,2</sup>

1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306;

2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

**摘要:** 计算机数值模拟是渔具水动力学研究的重要方法, 可直观呈现不同作业工况下渔具运动、形态、载荷和周围流场特征。本研究梳理了渔具水动力数值模拟研究的发展历程和应用现状, 重点归纳了数值模型的建立与仿真方法以及数值解析的算法与效率提升方式, 提出了渔具水动力数值仿真存在的不足和建议。总结发现, 渔具数值分析主要包括基于物理结构拓扑的动力学模型和基于 CFD 软件的流体力学模型仿真, 刚性运动方程的数值求解方式有显式算法和隐式算法, 降低单元节点数量和优化编程算法是提高解析速度的主要手段。建议今后研究应结合如海上非恒定流或不规则波、网囊渔获积聚等实际工况, 以及网线编织结构、非线性形变等力学特性完善数值模型及参数, 通过修正求解算法、优化节点拓扑和改进运算架构等加快数值计算效率, 加强渔具、渔法、海况和渔获联合的运动及流场仿真, 为渔具结构设计、渔法改进和水动力性能优化提供有效的研究方法。

**关键词:** 水动力; 数值模拟; 数值解析; 渔具

中图分类号: S972

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)10-1259-14

渔具是渔业生产中特殊的柔性装备, 广泛应用于内陆水域和海洋鱼类等资源捕捞。作为直接捕获水产经济动物的重要工具, 渔具时刻承受着水体施加的动载荷<sup>[1]</sup>, 表层作业渔具, 如流刺网<sup>[2]</sup>、张网<sup>[3]</sup>、建网<sup>[4]</sup>和敷网<sup>[5]</sup>等, 更受到波浪和水流的共同作用。渔具属于小尺度多孔刚柔组合结构体, 周围流场分布复杂<sup>[6]</sup>, 外力载荷下的形态与受力相互依赖且呈高度非线性关系<sup>[7]</sup>。近年来面对全球近海养殖空间日益紧张和渔业资源急需养护等问题, 沿海国家和地区不断加大对远海及公海捕捞的投入。我国发布的《“十四五”全国渔业发展规划》和《中国的远洋渔业发展》白皮书等明确提出要高标准高质量推进远洋渔业发展, 此形势下渔具生产作业将面临更为严峻的考验, 相应对其在波流作用下的运动响应、周围流场及作业性能评估提出更高要求。

渔具水动力研究方法包括理论分析、海上测试、物理模型实验和计算机数值模拟等<sup>[8]</sup>。数值模拟是现今渔具水动力分析、作业参数调整以及新型结构设计的高效辅助手段, 可减轻海上测试的繁重工作量, 规避模型实验的尺度比效应、刚度改变等问题, 具有参数易调整、研发周期短和成本低等优势。渔具数值模拟相关研究始于 20 世纪 90 年代, 发展至今已不再仅局限于对渔具系统及构件的运动与受力分析, 也可通过了解其周围流场分布、受鱼类行为及渔获物影响等<sup>[9-10]</sup>更全面理解渔具和流体间的耦合机制。目前, 数值模拟方法已广泛应用于由单一网片<sup>[7,11]</sup>到刺网<sup>[2]</sup>、延绳钓<sup>[12]</sup>、拖网<sup>[13]</sup>和围网<sup>[14]</sup>等复杂渔具系统的水动力研究。考虑到渔具种类型式繁多, 作业方式和渔获对象各异, 用于其水动力及流场分析的数值模型和解析方法内容多且涉及范围广, 缺乏系统

收稿日期: 2024-02-01; 修订日期: 2024-05-05.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401302).

作者简介: 李非(1991-), 男, 博士后, 从事渔具渔法研究. E-mail: f-li@shou.edu.cn

通信作者: 花传祥, 博士, 高级工程师, 从事远洋渔业系统集成研究. E-mail: cxhua@shou.edu.cn

性归纳梳理。本文回顾了渔具水动力数值模拟的发展历程和研究应用状况,总结分析了数值模型的构建仿真与解析方法以及不足之处,为今后渔具水动力数值分析研究提供参考。

## 1 数值模型的构建与仿真

渔具水动力数值模型的构建与仿真分析主要包括两种方式,一种是基于渔具物理模型几何拓扑分解,利用牛顿力学法等建立动力学模型,通过算法编程求解运动方程仿真渔具运动和受力状态<sup>[7,15-17]</sup>。另一种是借助计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件创建渔具结构模型并离散划分网格,通过数值迭代求解流体动力学控制方程,实现结构体应力载荷和周围流场仿真<sup>[6,18]</sup>。

### 1.1 基于几何拓扑的动力学仿真

有限元法(finite element method, FEM)是工程应用构建结构体物理模型的重要方法,核心是将连续的实际结构物离散为有限个通过单元连接的假想组合体<sup>[19-20]</sup>。渔具的几何拓扑分解方法主要有刚体有限元法和柔性有限元法<sup>[21]</sup>(图 1)。刚体有限元法最初用于对刚性体结构的分析,后拓展至渔业成为早期渔具数值建模的主要方法。1998年,法国学者 Bessonneau 等<sup>[22]</sup>提出将渔具离散为一系列刚性圆柱单元(图 2),基于牛顿第二定律建立运动方程拟合恒定流下渔具的平衡形态和张力的分布,以中层拖网为例粗略实现了其拖曳过程不同时刻的动态仿真。次年, Priour<sup>[23]</sup>考虑到网线的张力和刚度特性,将网片视为由大量三角形刚性单

元构成的集合体模拟了底拖网的平衡状态,由于该方法要求单个三角形单元内沿相同方向目脚须相互平行,限制了其仅可适用于菱形和方形网目的数值建模。2000年, Tsukrov 等<sup>[24]</sup>通过将网片离散为等效桁架结构,分析了网片在波流作用下的网目张力和形态响应并借助实验验证可行,不过桁架单元的划分数量会对仿真结果产生一定影响。国内研究人员余显炜<sup>[25]</sup>于 2001 年基于薄壳理论和曲面理论,结合差分格式求解分析了网衣受力与其形变的关系。2007年,袁军亭<sup>[26]</sup>将网片视作由刚性杆铰接系统建立三维力学模型,由水动力和形变角度比较了平面、圆柱、圆台和圆锥四种形状网片的理论计算与模型实验结果,该模型中定义了刚性杆之间通过无摩擦铰链联接,并以非线性形式表示杆单元的应力和应变关系,尽可能呈现网线的力学特性。刚体有限元法一定程度上简化了渔具物理模型,但各刚性单元间考虑了实际网目本不存在的压力,同时忽略了纤维网线的柔软性、弹性张力以及滤水性等特征,不完全符合网目的实际受力状况。不过,该方法计算量小,可粗糙反映渔具的载荷和形态,适合于初步分析或早期对求解精度要求不高的问题。

渔具系统及构件的柔性数值研究可分为几何形态分析和物理模型拓扑分析 2 个阶段。基于几何形态分析主要利用与构件几何形态近似的曲线方程进行拟合,通过改变方程参数实现对物体形变及载荷的预测<sup>[27]</sup>。不过,通过函数方程难以描述整体渔具系统以及表征运动与受力间复杂的非

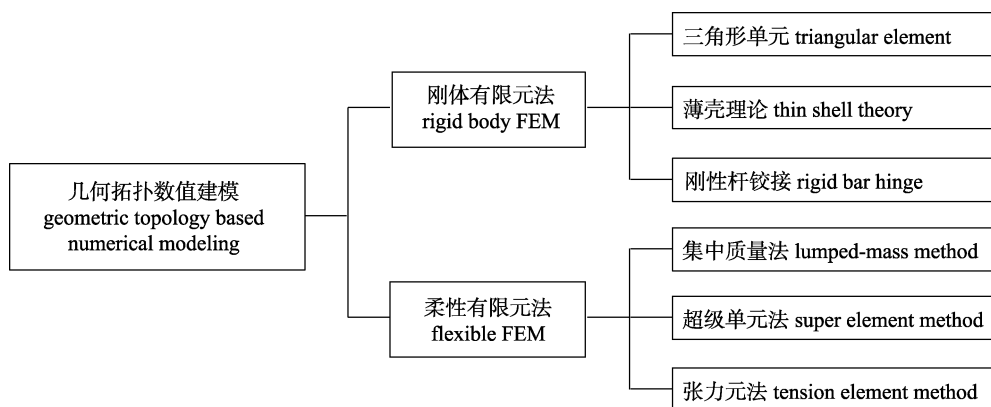


图 1 基于几何拓扑的渔具水动力学模型构建方法

Fig. 1 Methods for developing fishing gear hydrodynamical model based on geometric topology

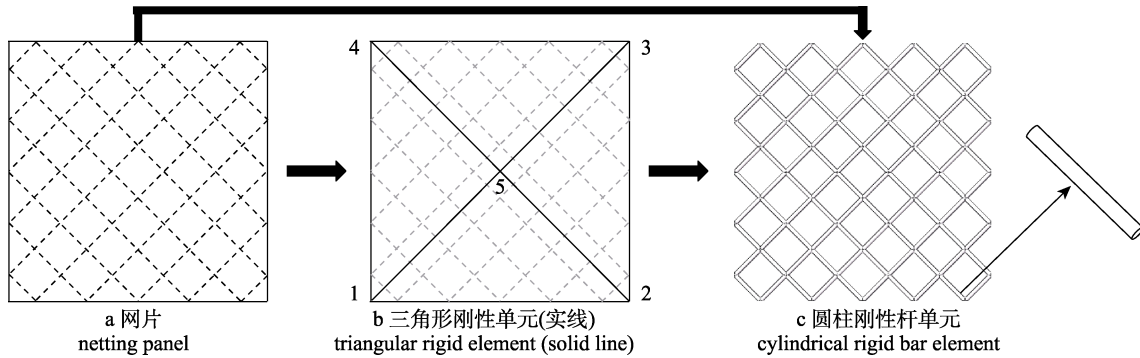


图 2 网片的刚体有限元拓扑方法

b 中阿拉伯数字表示三角形刚性单元节点.

Fig. 2 Rigid body finite element topology methods for netting panel  
Arabic numerals in b denote the nodes of triangular rigid elements.

线性关系<sup>[28-29]</sup>, 该方法仅适用于部分可通过曲线方程拟合的构件分析(如曳纲<sup>[30]</sup>和锚索<sup>[31]</sup>), 实际应用范围有限。随着对柔性体研究的深入, 柔性有限元法被提出并不断完善, 使得渔具系统的模拟更具物理真实感, 其中集中质量法和质点弹簧模型是国内外学者广泛应用的数值仿真方法。早在 1960 年, Walton 等<sup>[32]</sup>已提出类似于集中质量法的思想, 即以一系列系缚在无质量且不可拉伸绳上的离散质量点替代纲索质量, 解决海军开展海上核实验测试船系泊锚缆可能会因瞬间冲量过大而断裂的问题。1995 年, Hu 等<sup>[15]</sup>利用集中质量法将拖网曳纲划为由若干无质量等分直线段连接的离散质点(图 3), 在二维平面内基于拉格朗日方程理论推导分析了中层拖网系统拖曳速度和手柄长度对网具及网板沉降的影响。同年, Lee<sup>[33]</sup>将拖网网衣和网板简化为质点, 曳纲为渔船与网衣间连杆, 通过求解拉格朗日方程计算拖网系统的运动, 并设计出调控渔具作业深度的模糊控制器。自 21 世纪, 计算机技术和数值计算的发展使得对大型数据运算和渔具运动仿真成为可能。2002 年, Wan 等<sup>[7,34]</sup>将纲索和网片离散为由直线绳索单元无摩擦铰接的柔性集合体, 采用能量守恒定律建立非线性运动方程组, 拟合了恒定流下纲索和网片的静态平衡和张力的分布。2003 年, Takagi 等<sup>[35]</sup>假定渔具是由无质量弹簧连接质点组成的系统, 开发出渔具在水流作用下的形态和载荷分析系统“NaLA”。质点弹簧模型创新性地先将杆单元和绳单元替代为具有伸缩性的弹簧, 类似的拓扑

方法已在 1975 年被 Thresher 等<sup>[36]</sup>用于研究锚绳的投放过程。自此, 国内外报道了一系列基于质点弹簧模型开展渔具数值模拟的相关研究, 区别主要在于不同渔具类型的数值结构拓扑方式、作业工况和渔法操作过程差异<sup>[37-39]</sup>。利用柔性有限元法构建渔具数值模型很大程度上克服了刚体有限元法的缺陷, 仿真结果更符合渔具真实情况, 但同时带来了诸如模型基于多项假设、建模参数不确定性和数值计算量大等难题<sup>[16]</sup>。

网衣作为渔具重要的组成部分, 承受流体作用下的主要载荷。针对网衣结构的拓扑分解在“微观”上是将其简单视为网线的集合体, 并将单根目脚看作细圆柱, 通过采用小尺度光滑柱体和球体的水动力特性建立渔具系统的动力学模型<sup>[40-41]</sup>。不过, 纤维类网线柔软、表面粗糙且具有弹性, 本质上与圆柱体有一定差异, 同时未能考虑小冲角下目脚间的水流遮蔽效应<sup>[42]</sup>以及不同网目形状对水动力的影响<sup>[21]</sup>。若采用单根系泊绳的水动力系数计算流体载荷, 亦忽略了相邻网线间存在的交互作用<sup>[43]</sup>。为解决上述问题, 现今研究大多通过水槽实验获得网片含雷诺数、冲角、密度等参数的升、阻力系数进行后续数值计算<sup>[44-45]</sup>。此外, 另有研究人员通过其他数值方法分析渔具在波流作用下的运动响应, 如超级单元法、张力元法等。2006 年, Lader 等<sup>[46]</sup>将网片离散为具有与非线性弹簧相似结构特性的平面超级单元, 要求所有单元的法向矢量始终位于相同垂面内且不可旋转, 各面单元通过首尾节点连接, 据此构建网片

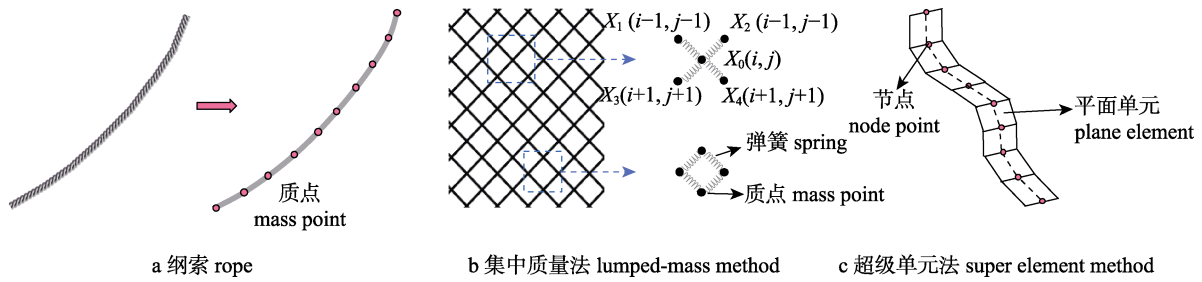


图 3 网索及网片的柔性有限元分解方法

Fig. 3 Flexible finite element decomposition methods for rope and netting panel

在波浪和水流作用下的数值模型。2018 年, Martin 等<sup>[47]</sup>指出质点弹簧模型缺少防止张力和网线变形的非物理机制, 提出一种通过几何约束建立各单元间关联度的张力元法, 并以水平网片为例模拟了其在不同重物下的形态。不过, 当网衣结节不受张力时系统会被低估且无解, 其次该方法无法精确模拟网片在松弛状态下网线的堆叠现象。

### 1.2 基于 CFD 软件的流体力学仿真

随着计算流体力学的日益成熟, 利用 ANSYS、ABAQUS 和 OpenFOAM 等 CFD 商业仿真软件解决渔具水动力相关数值分析问题受到新的关注, 其中 ANSYS 凭借其较好的操作性应用最为广泛。该类软件主要采用有限体积法等对连续的物理方程模型在空间和时间上进行离散化, 将非线性偏微分方程转变为求解网格单元的线性代数方程, 经多次计算迭代至收敛得到数值解<sup>[48]</sup>。CFD 软件的工程应用分析一般分为前处理、求解和后处理 3 个步骤, 具体包括几何模型创建、计算域分割、单元类型选择、材料属性定义、网格划分、载荷加载及边界条件约束、求解器设置、仿真计算和结果处理等。其中, 结构单元类型、网格划分方

式和物理模型求解是影响 CFD 软件数值仿真的重要因素(图 4)。

构建可靠的渔具系统数值模型, 需要选择合适的结构单元类型并进行合理划分网格。常见的单元类型有梁单元、杆单元、壳单元和管单元等, 各类单元间区别主要在于形变特性、空间纬度、节点数量及自由度不同。如梁单元既可承受拉力和压力, 也可承受弯矩, 各单元节点有 6 个自由度, 而杆单元仅可承受沿杆方向的拉力、压力, 不可承受弯矩, 每个节点仅有 3 个自由度, 壳单元则属于一种二维单元, 适用于薄壁结构的建模<sup>[49]</sup>。2017 年, Tang 等<sup>[50]</sup>认为拖网作业时因网线张力较大而不适合通过莫里森方程计算水动力, 采用了 ANSYS 中梁单元与大形变非线性结构模型仿真分析渔具阻力, 并比较了 5 种网线直径的拖网网口形态特征。2019 年, Chen 等<sup>[51]</sup>在通过 ABAQUS 中梁单元分析网片在不同流速下的形变和阻力时, 引入了“连接单元”用以表示相邻网目结节处的接触作用, 仿真计算与物理模型实验结果误差约在 10%。2020 年, Wan 等<sup>[4]</sup>利用 ANSYS 的管单元 (PIPE59) 建立建网系统数值模型, 通过分析不同

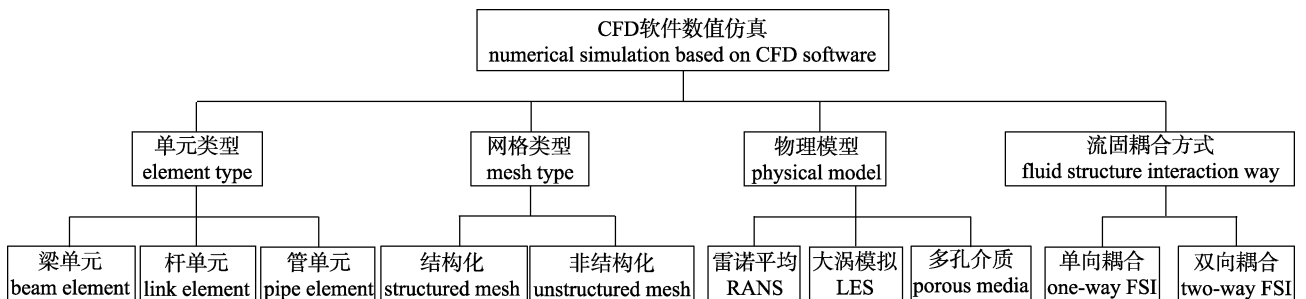


图 4 影响 CFD 软件数值仿真的重要因素

Fig. 4 Important factors affecting numerical simulation using CFD software

流速下网衣平衡状态和锚绳张力提出渔具作业工况建议, 其中该管单元结构具有轴向拉、压、扭、弯和大挠度等功能。因此, 在具体选择何种类型单元时需基于渔具及其构件的结构特征、几何形状和物理特性, 结合不同单元的适用条件和需求确定。网格划分的数量和质量与数值模型、求解精度、结果收敛性及仿真效率直接相关, 网格密度可通过网格类型和单元尺寸控制(图5), 网格质量优劣依据扭曲度、纵横比、尺寸变化率等指标评价。对于渔具系统及构件的尖角、孔洞和应力集中等特殊或复杂部位, 往往需调控单元尺寸特征、曲率、层数和增长率等参数进行局部网格加密处理。考虑到结构体壁面附近流场存在较大的法向速度梯度, 一般通过计算  $y^+$  值衡量第一层网格高度划分的合理性<sup>[52]</sup>。由于实际计算结果的精度与网格数量并非线性增长关系, 常采用网格独立性检验衡量网格数量对仿真的影响及灵敏度<sup>[53]</sup>。网格按照其数据结构分为结构网格和非结构网格, 前者的网格点彼此间有序、规则邻接, 单元包含 2D 四边形和 3D 六面体, 非结构化网格的节点分布是随机、无固定的, 每个网格点可有不同相邻网格数, 有 2D 三角形, 3D 四面体等单元形状<sup>[54]</sup>。结构化网格计算速度快、精度高、稳定性好、对内存等硬件要求低, 但网格的结构性、有序性限制了其对复杂几何构型的适应能力。相比之下, 非结构网格对复杂模型的灵活适应性强, 更易控制网格大小和节点密度, 但计算时需消耗较大内存。不过, CFD 软件的求解精度主要取决于网格数/质量, 受网格拓扑方式(结构/非结构网格)的影响相对较小<sup>[54]</sup>。若渔具系统含有运动或转

动构件(如推进器桨叶等)或考虑鱼类游动行为, 还需采用动网格技术分析计算域边界的运动问题。此外, ANSYS 等主流软件另支持通过更具网格生成优势的 ICEM 软件将网格划分完成后导入进行后续操作, 对于软件现有功能无法满足的复杂问题, 亦可通过用户自定义函数(user defined function, UDF)自行扩展<sup>[55]</sup>。

渔具作业时网衣的阻流效应使其前后流场存在较大的压力梯度, 对流场域的仿真是分析渔具水动力及其与流体耦合作用的前提, 利用何种流动模型表征水体流态尤为重要。湍流是常见的复杂非稳态流动, 其数值仿真方法包括直接模拟和非直接模拟, 因直接模拟法计算量过大目前尚不能完全实现, 非直接模拟方法主要有雷诺平均(RANS)和大涡模拟(LES)<sup>[56]</sup>。CFD 软件提供诸如湍流模型、多相流模型等物理模型, 常用的湍流模型包括  $k$ - $\epsilon$  ( $k$ - $\epsilon$ )模型、 $k$ - $\omega$  ( $k$ - $\omega$ )模型、LES 模型等, 多相流以用于追踪复杂运动界面的 VOF (volume of fluid)模型较为常见, 各模型区别主要体现在对湍动黏度、旋转、近壁区流动的处理不同<sup>[57]</sup>。 $k$ - $\epsilon$  模型是工业广泛应用的两方程湍流模型, 其中 Realizable  $k$ - $\epsilon$  模型对具有强逆压梯度的边界流动仿真较好, 更符合湍流的物理特性<sup>[58]</sup>。与  $k$ - $\epsilon$  模型相比, LES 模型通过求解 Navier-Stokes (N-S)方程直接计算流体的大尺度涡, 小尺度涡由模型进行模拟, 对计算机内存和 CPU 速度要求更高。2011 年, 赵云鹏等<sup>[59]</sup>基于 FLUENT 平台 Realizable  $k$ - $\epsilon$  紊流模型和多孔介质模型模拟了平面网片周围的三维流场分布, 通过模型实验对比验证了不同冲角下网衣附近的流速情况。结果发现网衣前

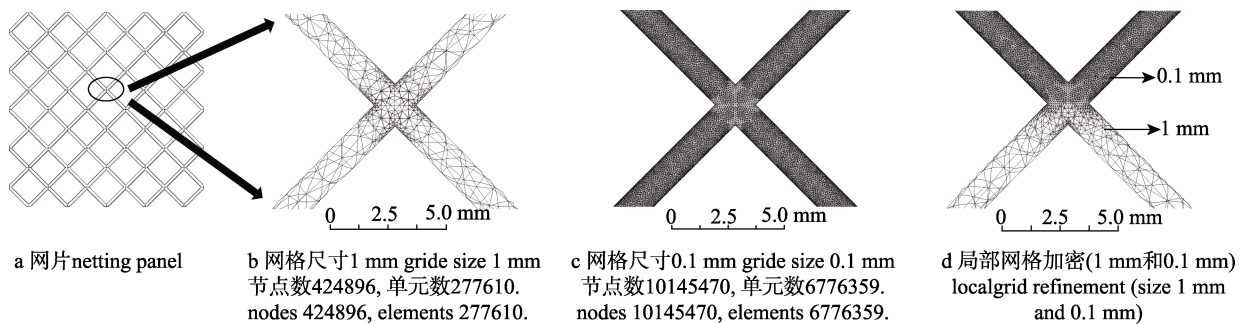


图5 不同网格尺寸的网片划分

Fig. 5 Meshing of netting panel with different grid sizes

后均存在流速衰减,但其两侧及底端流速升高,同时网衣后方流速衰减程度随冲角减小呈增大趋势。2017年,陈昌平等<sup>[60]</sup>依据有限元原理将网衣视为梁单元集合,基于 N-S 方程与 LES 湍流模型采用 ABAQUS 软件开展流固耦合数值分析,联合水槽实验探究了不同结构参数合金网衣在水流作用下的水阻力特性。其中,流体域物理量通过有限体积法结合有限单元法进行分析,结构域则单独采用有限单元法计算结构响应。鱼类由于其自身阻流和导流效应会增强周围水体的湍流程度<sup>[61-62]</sup>,具体与目标鱼种集群方式、游动速度、栖息深度及密度有关<sup>[63]</sup>,探究鱼类行为和流场关系对于渔具网囊、取鱼部等结构的优化具有实际指导意义。鱼类游动机理是鱼体行为仿真的基础,不同科鱼类的游动模式存在差异<sup>[64]</sup>,目前有关鱼类推进理论模型的应用较为有限,如细长体理论<sup>[65]</sup>、波动板理论等。2017年,Tang 等<sup>[9]</sup>通过将鱼体视为刚体结构,基于  $k-\omega$  SST 模型仿真分析了鱼类行为对网衣周围流场的影响,发现鱼群可导致其周围出现低压区而引发较强的流体扰动。

渔具与波流间的作用属于双向流固耦合(fluid structure interaction, FSI),网衣在流场中运动对流场所产生的影响和由此流场传递给网衣的作用力是相互的,考虑到网衣受力与其形态呈动态依赖,对渔具与流体进行交互迭代模拟更符合实际情况。相比之下,CFD 软件进行单向 FSI 分析仅包含将计算得到的流体载荷直接传递至结构物的单向传递,并不存在两者的交互作用。2022年,Zou 等<sup>[66]</sup>利用 ANSYS 平台的单向 FSI 分析了不同流速下无结聚乙烯网片占空率及冲角对其阻力和形变的影响,发现网片下游流速衰减率随占空率增加而增大,但与流速大小无关,同时网片最大形变量和应力随占空率增加逐渐减小。鉴于渔具网目细密性和柔软性,水流与渔具间的相互影响往往不可忽略,此情况下对渔具运动的拟合存在一定误差。2021年,Nsangué 等<sup>[67]</sup>通过构建经网目群化的底拖网三维几何模型,采用双向 FSI 探究了不同网线直径、材料和网目大小渔具的阻力及周围流场分布,仿真计算得到渔具中轴线流速及网口扩张高度与模型实验结果吻合较好。不

过,由于渔具规格尺度大、结构复杂,相关数值分析大多需借助计算机工作站,加之双向 FSI 分析计算量大,运算耗时长,目前渔具水动力数值仿真研究仍以单向 FSI 分析为主。针对某些网目整体细密的渔具,如舷提网、仔稚鱼采集装置等,其网衣形变与周围水体流态变化间存在更高层次的依赖性,可通过多孔介质模型模拟网片周围流场,再将由此得到的流场参数输入集中质量模型求解网衣受力与运动,基于两模型间多次迭代分析渔具系统与流体的双向耦合效应<sup>[68-69]</sup>。

## 2 数值模型的解析与计算效率

### 2.1 数值解析算法

渔具包含多种运动速度各异的构件(网衣、网板、沉/浮子等),同时网线因外力发生形变时应力和应变呈非线性关系,故渔具系统的数学模型常是以非线性二阶常微分方程组形式表示。对非线性动力学方程进行数值求解和精确计算是必要的,稳定性是渔具数值计算的首要条件<sup>[70]</sup>。早期对柔性体运动微分方程的求解方式多是将其转化为连续曲线,如将泊绳或曳纲视为悬链线<sup>[71]</sup>,由于基本运动方程的非线性,仅可在特定条件下进行理论求解,对于复杂方程或边界条件不规则情况则往往难以解决。现有渔具水动力问题的数值求解主要通过对运动方程进行离散化和差分,根据节点初值信息和边界条件对差分方程组进行迭代计算,求得达到动态平衡后运动位置的特解<sup>[21]</sup>。CFD 软件求解流体力学模型,提供基于压力法和密度法的两种求解器类型。其中,压力基求解器采用压力修正算法,主要用于求解不可压缩流体,密度基求解器多用于高速可压缩的流动求解,渔具水动力流场仿真主要采用压力基求解器计算。

实际工程问题涉及非线性方程的求解一般仅简单和典型的微分方程可得到数值解,大多无法求得精确的解析解。渔具数值微分方程的求解算法可分为显式算法和隐式算法,隐式算法较显式算法具有更大的绝对稳定区,更适合求解刚性方程。常见的显式算法包括如欧拉法(Euler)、龙格-库塔法(Runge-Kutta)等,隐式算法有预估-校正法(改进 Euler)、牛顿-拉夫森法(Newton-Raphson)、

纽马克  $\beta$  法(Newmark- $\beta$ )等(表 1)。显式算法直观易编程, 对计算步长敏感, 稳定性和精度较差, 为保证求解精度要求步长很小, 致使计算效率受限。隐式算法可适当加大步长, 稳定性大多高于显式算法, 但其每步迭代计算均需求解庞大的非线性方程组<sup>[42]</sup>, 使得部分人员更倾向于采用如 Runge-Kutta 法等显式算法<sup>[37,72]</sup>。某些情况下, 不同算法也可交叉使用, 如半隐式算法既具有显式算法计算量较小的优点, 同时兼顾隐式算法的稳定性, 但该算法需计算雅可比矩阵, 对求解大型刚性方程组有一定难度。2015 年, 周成<sup>[70]</sup>采用有限差分形式的隐式预估校正法求解围网系统的运动方程, 在保证数值解精度和稳定性的前提下降低了计算量。2022 年, Li 等<sup>[5]</sup>基于舷提渔具系统

的水动力分析建立运动方程, 通过六级五阶龙格库塔法求解并探究了作业工况、渔具参数和操作技术对舷提网作业性能的影响。计算步长是求解刚性微分方程的重要参数, 其取值不仅直接影响计算量和解的收敛性, 同时与程序循环中运动物理量逐步积累的截断误差有关, 影响拟合精度<sup>[73]</sup>。此外, 数值模型求解的稳定性还与渔具结构及其运动状态的复杂程度、求解精度和材料弹性模量等有关。CFD 软件以 ANSYS 为例, 可供选择的求解算法有 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equation)、SIMPLEC (SIMPLE consistent)、PISO (pressure implicit split operator) 和 Coupled (coupled pressure-based solver), 默认使用 SIMPLE 算法。SIMPLEC 算法是在 SIMPLE

表 1 常见数值模型求解算法  
Tab. 1 Common algorithms for solving numerical models

数值算法 numerical algorithm	特性 characteristic
Euler 法 Euler method	通过差商代替导数, 一阶单步法。包含前向欧拉法(显式)和后向欧拉法(隐式)。前者收敛性和稳定性较差, 要求小步长; 后者无条件稳定, 求解繁琐。 substitute derivative by difference quotient, first-order single-step method. Contain the forward Euler (explicit) and backward Euler methods (implicit). Poor convergence and stability for the former method, require small time step; unconditionally stable but tedious to solve for the latter method.
Runge-Kutta 法 Runge-Kutta method	显式, 易于编程, 常需构造至 5 阶或 6 阶公式, 对步长敏感, 要求其足够小。 explicit, easy to program, often need construct to 5th or 6th order formula, sensitive to time step, require step small enough.
预估-校正法 predictor-corrector method	综合欧拉法和梯形公式法, 算法相对复杂, 精度较欧拉法高, 但低于梯形公式法。 combine Euler method and trapezoidal formula method, complex algorithm, higher accuracy than Euler method, but lower than trapezoidal formula method.
Newton-Raphson 法 Newton-Raphson method	隐式, 收敛速度快, 局部收敛性强, 稳定性较好, 对初值选取要求高。 implicit, fast convergence, strong local convergence, better stability, high requirement for initial value selection.
Newmark- $\beta$ 法 Newmark- $\beta$ method	隐式, 可直接求解二阶微分方程, $\beta \geq 1/4$ 时计算无条件收敛。 implicit, directly solve second-order differential equation, unconditionally converge for $\beta \geq 1/4$ .
有限元法 finite element method	理论基础简明, 可较好适用于复杂几何结构, 灵活性和适用性强, 常用于求解刚体有限元方程, 计算时需构造矩阵。 simple theoretical basis, better used to complex geometric structure, strong flexibility and applicability, often used to solve rigid body finite element equation, need construct the matrix when calculation.
SIMPLE 算法 SIMPLE algorithm	半隐式算法, 可处理复杂几何形状, 使用任意类型网格划分, 应用广泛。需多次迭代方可收敛, 对初值敏感。 semi-implicit algorithm, handle complex geometries and use any type of meshing, widely used. Need repeat iterations to converge, sensitive to initial value.
SIMPLEC 算法 SIMPLEC algorithm	SIMPLE 的改进, 收敛性相对更好, 计算耗时短, 适合稳态计算。 improvement of SIMPLE, better convergence, short time consumption, suitable for steady-state computation.
PISO 算法 PISO algorithm	隐式算法, 计算量大, 迭代次数少, 适合多相流模型、不定常流动和瞬态计算, 稳定性好。 implicit algorithm, computationally intensive, few iterations, suitable for multiphase model, unsteady flow and transient calculation, good stability.
Coupled 算法 Coupled algorithm	半隐式算法, 收敛速度较慢, 适合稳定单相流计算。 semi-implicit algorithm, slow convergence, suitable for stabilized single-phase calculation.

算法基础上改进了通量修正方法,收敛速度有所提升,但因每次迭代得到的压强场无法完全满足动量方程,需反复迭代直至收敛。PISO 算法在迭代计算中增加了动量修正和网格畸变修正,以解决 SIMPLE 算法计算压强场与动量方程偏离过大的问题,因迭代次数减少,收敛更快。Coupled 算法是一种基于压力的耦合算法,可同时求解动量方程和连续性方程,提高了求解精度和效率<sup>[74]</sup>。

## 2.2 数值计算效率提升方法

渔具数值模拟虽已实现运动、受力和流场分布的仿真拟合,但仍面临求解规模大、计算迭代次数多和运行时间长等限制,随着渔具结构的大型化与复杂化,对数值模型的计算效率提出了更高要求。数值仿真节点数量是影响运算速度的关键要素,直接将渔具离散为相互独立的结节和目脚并对所有单元建模求解是困难的,需在计算精度和运算效率间寻求平衡,以较低的计算成本获得尽可能的理想结果。如,在质点弹簧模型中,质量点数目越多,渔具形态和载荷分布拟合越为细腻精确,但受制于计算机软硬件性能,实际计算难以增加足够多的质点详细描述渔具运动特征。CFD 软件分析求解渔具水动力问题,网格数量增加会更多消耗计算资源,但当达到一定数量后仿真结果并不再明显提升,有必要在求解前确定合理的网格划分精度。可根据渔具不同部位的重要程度,在关键部位设定更多质点或更密网格,其他区域仅确保单元数量满足计算需求即可,同时保障仿真精度和解析效率。目前,渔具数值计算主要通过减少计算节点或单元数量和优化编程算法等方式,提高求解速度,降低运算成本。

网目群化是降低计算节点规模的常用方法,该方法自被 Bessonnet 等<sup>[22]</sup>提出后即受到广泛应用和不断发展<sup>[11,75]</sup>。网目群化主要有两种方式(图 6),一种是直接将网衣拓扑为具有结节和目脚结构特性的离散网片单元,2003 年, Tsukrov 等<sup>[76]</sup>基于网片阻力经验公式提出以具有相同流体动力学和弹性特性的等效网单元替代实际网片,结果显示将网衣划分为不同数目网片单元并不显著影响网片在水流作用下的水动力。忽略渔具大量的目脚和结节进而将网衣简化为与其水动力特性近

似的多孔结构物是降低数值计算成本的有效方法,最早应用于防波堤的相关研究<sup>[77]</sup>。2010 年, Patursson 等<sup>[78]</sup>将网箱的网衣系统视为多孔结构物,根据网片在不同流速和冲角下的水槽实验确定最适多孔介质系数,采用 CFD 软件快速模拟了网片周围的流场分布。不过,若利用多孔介质模型对结构复杂的渔具系统进行建模,流场网格划分将较为困难且细密,计算耗时长<sup>[42]</sup>。另一种群化方式则是在保证群化前后网目满足一定等效条件下对多个网目进行合并,该方法的应用最为广泛。2004 年, Takagi 等<sup>[79]</sup>分别将实际网衣的 4 目和 16 目合并为 1 个虚拟网目,通过对比网片在两种方式下的拟合形态和计算时间,发现 4 目网目群化时的耗时虽然稍长,但拟合效果差异更小,提出将 4 个网目进行群化更合适。随后,万荣等<sup>[80]</sup>于 2007 年比较了 4 组不同网目群化数目(6×6, 8×8, 9×9 和 10×10)的计算精度、耗时和内存使用情况,认为将约 64 个实际网目群化为 1 个虚拟网目可满足工程应用要求。陈应龙等<sup>[81]</sup>为提高大型中层拖网系统的仿真效率,除采用网目群化法外,同时将系统分为曳纲、网身和网囊三部分依次求解,通过降低单次计算的矩阵维度,进一步减少运算时间并提高计算稳定性。网目群化法对大多类型渔具是适用的,但对类似于拖网等网片并不完全规则的渔具而言,其对仿真效率的提升空间可能受限<sup>[42]</sup>,另对最佳的网目合并数量仍有待探讨。利用 CFD 软件求解渔具水动力,可通过设置多核并行计算、优化网格数量及质量、选择合适求解器等方式加快计算速度。借助计算机编程优化算法或数据结构等方式提高数值仿真效率同样是值得关注的内容。渔具物理模型节点繁多,为保证计算精度通常又需采用百分甚至千分数量级的计算步长,无论利用计算机编程或是 CFD 商业软件,每步仿真均需求解大规模的非线性微分方程组,制约渔具系统和数值模型向更复杂、更精确的方向发展。除提升计算机硬件配置外,另有基于算法优化等角度寻求提高渔具系统仿真计算效率(表 2)。不过,数值解析方法不可仅由数学算法角度出发,亦需结合渔具特殊的力学特性及作业条件等,防止数值仿真结果失真脱离物理意义和实际生产。



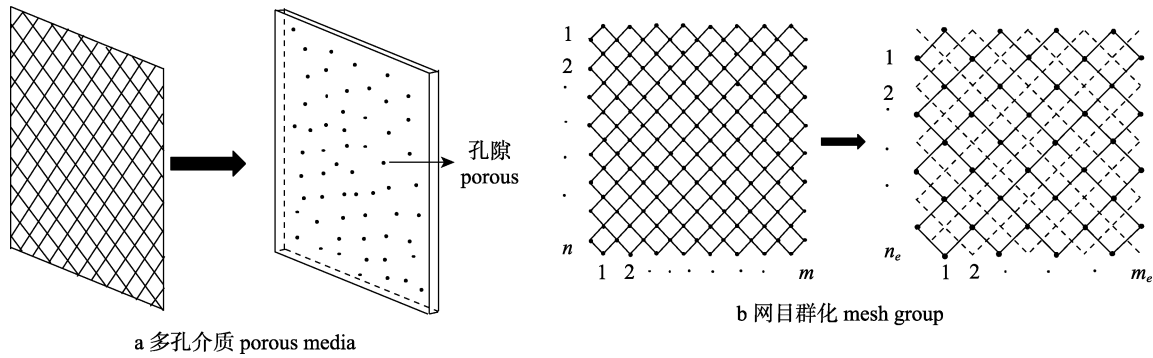


图 6 降低计算节点规模的方法

Fig. 6 Methods for reducing the number of computational nodes

表 2 数值计算效率的提升方法

Tab. 2 Methods to improve the efficiency of numerical calculation

年份 year	参考文献 reference	方法 method	仿真效果 simulation result
2008	Lee 等 <sup>[82]</sup>	质点弹簧模型中引入非主动节点(non-active) introduce non-active nodes in the mass-spring model	较无节点节省 30% 仿真时间, 网衣形态拟合更接近真实运动. save 30% calculation time compared with no nodes, fitted netting morphology closer to real motion.
2012	Zhang 等 <sup>[83]</sup>	增加虚质点构建矩阵化网络数据结构, 采用分布式计算方法. add virtual mass points to develop matrixed network data structure, use distributed compute method.	快速达到平衡状态, 提高仿真效率. reach equilibrium quickly, improve simulation efficiency.
2012	Zhang 等 <sup>[84]</sup>	全隐式算法和虚拟神经晶格方法 whole-implicit algorithm and virtual neural lattice method	较精确且高效模拟延绳钓水下展开情况. more accurate and efficient to simulate underwater deployment of longline.
2012	Gao 等 <sup>[85]</sup>	3 次 B 样条曲线插值法 cubic B-spline interpolation surface method	实现中层拖网实时运动仿真, 开发生产模拟器. realize real-time motion simulation of mid-water trawl, develop production simulator.
2016	姚叶明 <sup>[42]</sup>	基于数值稳定性判据的物理参数优化算法 physical parameter optimization algorithm based on numerical stability criterion	步长大于 0.005 s 可实现拖网运动实时模拟, 部分物理参数偏离实际值致使某些结果失真. real-time simulation of trawl motion when step greater than 0.005 s, physical parameter deviates from actual values make some results distortion.
2016	Devilliers 等 <sup>[86]</sup>	自适应网格优化 adaptive mesh refinement method	占用存储内存小, 节省 CPU 处理时间. occupy little storage, save CPU processing time.
2021	施兴华等 <sup>[87]</sup>	基于 Morison 方程调整水动力系数 adjust hydrodynamic coefficient based on Morison equation	解决群化后浮力增加问题, 减少求解时间, 降低计算成本. solve the problem of buoyancy increase after grouping, reduce solution time and calculation cost.

### 3 总结与展望

渔具装备是我国发展深蓝渔业的重要基础支撑, 高效可靠的数值仿真方法是设计性能优良和生态友好型渔具的技术保障。渔具水动力分析是复杂的系统性研究, 涉及理论力学、流体力学、材料力学和鱼类行为学等内容。目前国内外研究人员已在渔具数值仿真和计算解析方面取得了丰

硕成果, 但仍存在诸多尚未解决或仍需深入探讨的问题。今后亟需在现有基础上, 结合理论分析、海上测试和模型实验, 增强与数值模拟的协同互补, 系统开展渔具水动力基础应用研究。

基于渔具水动力数值模拟研究状况, 可在以下 3 个方面加强数值仿真的精度和计算求解的速度。(1) 结合渔具力学理论和实验测定完善数值模型。通过对目标渔具的生产操作与力学分析, 明

确影响作业性能的关键因子, 增添或优化模型参数。如考虑流速随水深变化、底拖网与海底摩擦、波流联合对表层渔具影响及双向耦合作用、刚柔连接部位的力学传递、鱼类游动行为、渔获物积聚等实况。其次, 通过实验测定网线各类编织结构、网材应力与应变的非线性、阻尼等力学性能, 以及不同构件和属具在非恒定流、不规则波、振动情形下的水动力系数、附加质量系数等参数, 利用声学技术、三维网形测量等手段获取更精准、全面的海洋环境和渔业生产验证数据, 提升数值模型反映渔具真实作业的预测能力。(2) 基于网衣拓扑结构和算法优化提升数值计算效率。针对不同类型渔具寻求相适应的网目群化或网格优化方式, 降低物理模型的质点与单元数量。同时, 基于算法求解原理、渔具结构、程序底层架构及软件运算机制, 通过修正解析算法、改进节点拓扑方式、并行计算、提前分配内存、优化数据结构及存储等方式加快求解速度。(3) 结合流体力学分析和生产操作仿真优化渔具渔法。基于渔用网线编结、捻度、粗糙度等基本几何特征创建结构单元模型, 采用 LES、光滑粒子流等高性能流体模型, 通过捕捉波流经过网线的绕流、涡旋形成及脱落方式改进网片单元结构。其次, 基于捕捞渔具不同生产阶段作业特点, 结合计算机视觉识别、人工智能等新技术仿真优化诸如放纲长度、拖速和起网速度等渔法操作参数指导生产。

#### 参考文献:

- [1] Klebert P, Lader P, Gansel L, et al. Hydrodynamic interactions on net panel and aquaculture fish cages: A review[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 58(4): 260-274.
- [2] Shimizu T, Takagi T, Korte H, et al. Application of NaLA, a fishing net configuration and loading analysis system, to drift gill nets[J]. *Fisheries Research*, 2005, 76(1): 67-80.
- [3] Liu L L, Wan R, Huang L Y, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of stow net in wave and current[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(5): 24-29. [刘莉莉, 万荣, 黄六一, 等. 波流场中张网渔具水动力学特性的数值模拟[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(5): 24-29.]
- [4] Wan R, Guan Q L, Li Z G, et al. Study on hydrodynamic performance of a set-net in current based on numerical simulation and physical model test[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 195: 106660.
- [5] Li F, Song L M, Hua C X, et al. Numerical and experimental investigation on hydrodynamic performance of the stick-held dip net in Pacific saury fishery[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 985086.
- [6] 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[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 62: 25-37.
- [7] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68(4): 815-823.
- [8] Xu L X, Tang H. Gear performance of the purse seine: A review[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(3): 713-726. [许柳雄, 唐浩. 围网网具性能研究进展[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(3): 713-726.]
- [9] Tang M F, Xu T J, Dong G H, et al. Numerical simulation of the effects of fish behavior on flow dynamics around net cage[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 64: 258-280.
- [10] Priour D, de la Prada A. An experimental/numerical study of the catch weight influence on trawl behavior[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 94: 94-102.
- [11] Li Y C, Zhao Y P, Gui F K, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of submerged plane nets in current[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(17-18): 2352-2368.
- [12] Song L M, Qi Y K, Li J, et al. Dynamic simulation of pelagic longline retrieval[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(2): 455-466.
- [13] Liu J B, Tang H, Xu L X, et al. Effect of tilt state on the hydrodynamics and surrounding flow field characteristics of V-shaped otter board[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(5): 755-769. [刘景彬, 唐浩, 许柳雄, 等. 倾斜状态对 V 形网板水动力和周围流场特征的影响[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(5): 755-769.]
- [14] Hosseini S A, Lee C W, Kim H S, et al. The sinking performance of the tuna purse seine gear with large-meshed panels using numerical method[J]. *Fisheries Science*, 2011, 77(4): 503-520.
- [15] Hu F X, Matuda K, Tokai T, et al. Dynamic analysis of midwater trawl system by a two-dimensional lumped mass method[J]. *Fisheries Science*, 1995, 61(2): 229-233.
- [16] Lee C W. Dynamic analysis and control technology in a fishing gear system[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68: 1835-1840.
- [17] Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T. Development of the numerical simulation method of dynamic fishing net shape[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2002, 68(3): 320-326.

- [18] Cui Y, Guan C T, Wan R, et al. Numerical simulation of a flatfish cage system in waves and currents[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 56: 26-33.
- [19] Xie J B, Liu Y Q, Zhang P F. Outline of finite element method[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2007(5): 29-30. [谢江波, 刘亚青, 张鹏飞. 有限元方法概述[J]. *现代制造技术与装备*, 2007(5): 29-30.]
- [20] Chen X D, Yang J, Zhao X D, et al. The status and development of finite element method[J]. *Machine Design and Manufacturing Informatization*, 2010, 39(11): 6-8, 12. [陈锡栋, 杨婕, 赵晓栋, 等. 有限元法的发展现状及应用[J]. *中国制造业信息化*, 2010, 39(11): 6-8, 12.]
- [21] Zhang X F, Hu F X, Xu L X, et al. Development of numerical computer simulation on fishing nets[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(3): 83-93. [张新峰, 胡夫祥, 许柳雄, 等. 网渔具计算机数值模拟的研究进展[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(3): 83-93.]
- [22] Bessonneau J S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls)[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(7): 563-583.
- [23] Priour D. Calculation of net shapes by the finite element method with triangular elements[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 1999, 15(10): 755-763.
- [24] Tsukrov I I, Ozbay M, Swift M R, et al. Open ocean aquaculture engineering: Numerical modeling[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2000, 34(1): 29-40.
- [25] She X W. Introduction to computational mechanics of fishing gear[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 2001. [余显炜. 计算渔具力学导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001.]
- [26] Yuan J T. Development and application of the 3D numerical netting model (3DNNM)[D]. Shanghai: Shanghai Fisheries University, 2007. [袁军亭. 网片的三维力学模型研究及应用[D]. 上海: 上海水产大学, 2007.]
- [27] Lu Z H, Zhang Z Y, Chen D F. Real time simulation of soft body deformation based on finite element method[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2012, 36(4): 700-703, 707. [陆忠华, 张争艳, 陈定方. 基于有限元法的柔性体变形实时模拟[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2012, 36(4): 700-703, 707.]
- [28] Chen C P, Li Y F, Zheng Y N, et al. A progressive study on the similarity criterions of fishing net models[J]. *Journal of Dalian University*, 2014, 35(3): 37-39. [陈昌平, 李艳芳, 郑艳娜, 等. 渔网网衣模型相似准则研究进展[J]. *大连大学学报*, 2014, 35(3): 37-39.]
- [29] Chen M Y. A study on small-scaled Reynolds similarity criterion for model test of the body of trawl net[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1980, 4(4): 319-328. [陈明义. 拖网模型试验小尺度雷诺相似准则的理论探讨[J]. *水产学报*, 1980, 4(4): 319-328.]
- [30] She X W, Yu C D, Hu F X. A calculation of the configuration and tension of the warp[J]. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 1984, 3(2): 167-177, 5. [余显炜, 虞聪达, 胡夫祥. 曳纲形状和张力计算[J]. *浙江水产学院学报*, 1984, 3(2): 167-177, 5.]
- [31] She X W. Study on tensions and configuration calculation of plane net under effects of sea currents and waves[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2007, 26(2): 115-124. [余显炜. 水流和波浪作用下平面网片张力和形状计算的研究[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2007, 26(2): 115-124.]
- [32] Walton T S, Polachek H. Calculation of transient motion of submerged cables[J]. *Mathematics of Computation*, 1960, 14(69): 27-46.
- [33] Lee C W. Depth control of a midwater trawl gear using fuzzy logic[J]. *Fisheries Research*, 1995, 24(4): 311-320.
- [34] Wan R, Hu F X, Tokai T, et al. A method for analyzing the static response of submerged rope systems based on a finite element method[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68(1): 65-70.
- [35] Takagi T, Shimizu T, Suzuki K, et al. Performance of "NaLA": A fishing net shape simulator[J]. *Fisheries Engineering*, 2003, 40(2): 125-134.
- [36] Thresher R W, Nath J H. Anchor-last deployment simulation by lumped masses[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1975, 101(4): 419-433.
- [37] Suzuki K, Takagi T, Shimizu T, et al. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets[J]. *Fisheries Science*, 2003, 69(4): 695-705.
- [38] Lee C W, Lee J H, Cha B J, et al. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(3-4): 331-347.
- [39] Liu L L. Numerical simulation study on hydrodynamic characteristics of net fishing gear—Take gillnet and stow net as examples[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 1-7. [刘莉莉. 网渔具水动力学特性的数值模拟研究——以刺网和张网为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 1-7.]
- [40] Keulegan G H, Carpenter L H. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1958, 60(5): 423-440.
- [41] Yao X J, Gui F K, Meng A, et al. Experimental study on hydro-coefficients of horizontal cylinder structure in waves[J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(1): 80-87. [姚晓杰,

- 桂福坤, 孟昂, 等. 波浪要素对水平圆柱杆件水动力系数影响研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(1): 80-87.]
- [42] Yao Y M. Research on numerical modeling of hydroelastic characteristics of pelagic trawl gear system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 47-70. [姚叶明. 拖网网具系统水弹性力学特性的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 47-70.]
- [43] Zhan J M, Hu Y Z, Zhao T, et al. Hydrodynamic experiment and analysis of fishing net[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(2): 49-53. [詹杰民, 胡由展, 赵陶, 等. 渔网水动力试验研究及分析[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 49-53.]
- [44] Tang H. Study on hydrodynamic characteristic and sinking performance of tuna purse seine[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 83-99. [唐浩. 金枪鱼围网网具水动力特性及沉降性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 83-99.]
- [45] Xu T J, Zhao Y P, Dong G H, et al. Analysis of hydrodynamic behaviors of multiple net cages in combined wave-current flow[J]. Journal of Fluids Structures, 2013, 39: 222-236.
- [46] Lader P F, Fredheim A. Dynamic properties of a flexible net sheet in waves and current—A numerical approach[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(3): 228-238.
- [47] Martin T, Schacht S, Riesen P, et al. Efficient implementation of a numerical model for flexible net structures[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 272-279.
- [48] Xing J Z, Li J. Methods of creating model and grid partition of ANSYS[J]. China Water Transport (Academic Version), 2006, 6(9): 116-118. [邢静忠, 李军. ANSYS 的建模方法和网格划分[J]. 中国水运(学术版), 2006, 6(9): 116-118.]
- [49] Ling G L, Shen Z Y. ANSYS structural units and materials applications handbook[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. [凌桂龙, 沈再阳. ANSYS 结构单元与材料应用手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.]
- [50] Tang M F, Dong G H, Xu T J, et al. Numerical simulation of the drag force on the trawl net[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2017, 17(6): 1219-1230.
- [51] Chen C P, Liu H F, Huang Y, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of a metal net for deep-sea aquaculture[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(6): 1273-1281.
- [52] Cao Y. ANSYS 18.0 finite element analysis from beginner to proficient[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018. [曹渊. ANSYS 18.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.]
- [53] Li F. Study on hydrodynamics and catch performance of stick-held dip net for Pacific saury[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 30-46. [李非. 秋刀鱼舷提网网具水动力及作业性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 30-46.]
- [54] Hu K, Hu T T, Ma H F, et al. ANSYS CFD fundamental guide and applications of computational fluid dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018. [胡坤, 胡婷婷, 马海峰, 等. ANSYS CFD 入门指南 计算流体力学基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.]
- [55] Hu K. ANSYS Fluent secondary development guide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021. [胡坤. ANSYS Fluent 二次开发指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.]
- [56] Zhao X F, Mao Z Y. Review on numerical simulation methods for turbulent flow[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Structural Engineering. Beijing: Engineering Mechanics Magazine, 2008: 604-607. [赵雪峰, 茅泽育. 紊流数值模拟方法研究进展[C]//第 17 届全国结构工程学术会议. 北京: 《工程力学》杂志社, 2008: 604-607.]
- [57] Li X C, Li X H, Li J, et al. Application of different turbulence models in inlet pipe of pumping station[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(5): 61-67, 81. [李晓超, 李晓鹤, 李君, 等. 不同湍流模型在泵站进水管道的应用研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(5): 61-67, 81.]
- [58] Bi C W. Investigation on the characteristics of flow field and wave propagation inside and around the aquaculture net cage[D]. Dalian: 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[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.]
- [59] Zhao Y P, Bi C W, Dong G H, et al. Three dimensional numerical simulation of the flow field around fishing net panel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5): 606-613. [赵云鹏, 毕春伟, 董国海, 等. 平面网衣周围流场的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(5): 606-613.]
- [60] Chen C P, Wang W, Zheng J C, et al. Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of the plane metal net under current[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(3): 363-368. [陈昌平, 王文, 郑佳成, 等. 水流作用下平面金属网衣水阻力特性数值模拟[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(3): 363-368.]
- [61] Plew D R, Klebert P, Rosten T W, et al. Changes to flow and turbulence caused by different concentrations of fish in a circular tank[J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(3): 364-383.
- [62] Johansson D, Juell J E, Oppedal F, et al. The influence of the pycnocline and cage resistance on current flow, oxygen flux and swimming behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)

- in production cages[J]. *Aquaculture*, 2007, 265(1-4): 271-287.
- [63] Zhou Y Q, Wang J, Qian W G, et al. Review of fish schooling behavior study[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(5): 734-743. [周应祺, 王军, 钱卫国, 等. 鱼类集群行为的研究进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(5): 734-743.]
- [64] Wei Q P, Wang S, Tan M, et al. Research development and analysis of biomimetic robotic fish[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2012, 32(10): 1274-1286. [魏清平, 王硕, 谭民, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. *系统科学与数学*, 2012, 32(10): 1274-1286.]
- [65] Wang J X, Tan X B. A dynamic model for tail-actuated robotic fish with drag coefficient adaptation[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(6): 659-668.
- [66] Zou B Q, Thierry N N B, Tang H, et al. The deformation characteristics and flow field around knotless polyethylene netting based on fluid structure interaction (FSI) one-way coupling[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2022, 7(1): 89-102.
- [67] Nyatchouba Nsangue B T, Tang H, Xu L X, et al. Comparison between physical model testing and numerical simulation using two-way fluid-structure interaction approach of new trawl design for coastal bottom trawl net[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109112.
- [68] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H, et al. Numerical simulation of the interaction between flow and flexible nets[J]. *Journal of Fluids Structures*, 2014, 45: 180-201.
- [69] 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[J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 59: 1-12.
- [70] Zhou C. Study of tuna purse seine performance based on numerical simulation[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015: 11-16. [周成. 基于数值模拟的金枪鱼围网性能的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 11-16.]
- [71] Sato K, Miyazaki Y. A study on an approximation calculation for towing fishing gears[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1984, 50(5): 793-804.
- [72] Zhu L X, Liang Z L, Huang L Y, et al. Numerical simulation of dynamic response of supple nets[J]. *China Ocean Engineering*, 2006, 20(3): 443-456.
- [73] Gui F K, Zuo X, Pan Y, et al. The effect on numerical precision for simulating frame floating structure tethered by a mooring cable in waves[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(4): 1-10. [桂福坤, 左孝, 潘响, 等. 波浪作用下刚性框架浮体及其锚绳运动数值模拟精度分析[J]. *海洋工程*, 2018, 36(4): 1-10.]
- [74] Liu B. Fluent 19.0 fluid simulation from beginner to proficient[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. [刘斌. *Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.]
- [75] Cheng H, Huang L Y, Ni Y, et al. Numerical and experimental study of SPM fish cage: Comparison and validation [C]// *Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Madrid: The American Society of Mechanical Engineers, 2018: 1-8.
- [76] Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, et al. Finite element modeling of net panels using a consistent net element[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251-270.
- [77] Jensen B, Jacobsen N G, Christensen E D. Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 84: 56-72.
- [78] Patursson Ø, Swift M R, Tsukrov I, et al. Development of a porous media model with application to flow through and around a net panel[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(2-3): 314-324.
- [79] Takagi T, Shimizu T, Suzuki K, et al. Validity and layout of "NaLA": A net configuration and loading analysis system[J]. *Fisheries Research*, 2004, 66: 235-243.
- [80] Wan R, He X, Wang X X, et al. A method of mesh group for fish cage anti-current characteristics by means of finite element analysis[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(6): 31-34. [万荣, 何鑫, 王欣欣, 等. 一种适用于网箱耐流特性有限元分析的网目群化方法[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(6): 31-34.]
- [81] Chen Y L, Zhao Y G, Zhou H, et al. Simulation study of large mid-water trawl system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(4): 625-632. [陈英龙, 赵勇刚, 周华, 等. 大型中层拖网网具系统的仿真研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(4): 625-632.]
- [82] Lee J H, Karlsen L, Lee C W. A method for improving the dynamic simulation efficiency of underwater flexible structures by implementing non-active points in modelling[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(9): 1552-1558.
- [83] Zhang X F, Li Y W, Song L M, et al. Matrixing network and distributed computing in the simulation of fishing nets[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 37: 79-84.
- [84] Zhang X F, Cao D M, Song L M. Application of whole-implicit algorithm and virtual neural lattice in pelagic longline modeling[C]// *Proceedings of the 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 2603-2606.
- [85] Gao S, Yin Y, Sun X F, et al. Dynamic simulation of fishing

- net based on cubic B-spline surface[C]// Xiao T, Zhang L, Fei M. Communications in Computer and Information Science. Heidelberg: Springer, 2012: 141-148.
- [86] Devilliers M, Vincent B, Mnassri I. A new adaptive mesh refinement to model water flow around fishing nets[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 34-43.
- [87] Shi X H, Zhou Y, Qian J Q, et al. Research on numerical simulation method of mesh group of cage net based on hydrodynamic performance[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(3): 74-79, 96. [施兴华, 周游, 钱佶麒, 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]. 2021, 48(3): 74-79, 96.]

## Review of numerical simulation of fishing gear hydrodynamics

LI Fei<sup>1</sup>, HUA Chuanxiang<sup>1,2</sup>, SONG Liming<sup>1,2</sup>, ZHU Qingcheng<sup>1,2</sup>

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Numerical computer simulation is an important method to study the hydrodynamics of fishing gear, providing visualization of motion, morphology, loading, and surrounding flow characteristics under different operating conditions. Here, the research progress of hydrodynamics and the application of fishing gear based on numerical simulation were reviewed. Additionally, the development and simulation methods of numerical models, as well as solving algorithms and efficiency improvement approaches of numerical analyses were summarized in detail. Finally, the disadvantages and suggestions of numerical research on fishing gear hydrodynamics were put forward. The summary showed that the numerical analysis of fishing gear primarily involves the dynamics model based on the topology of physical structure and the hydrodynamic model based on computational fluid dynamics (CFD) software. Both explicit and implicit algorithms were used to calculate the rigid motion equations and reducing the number of elements and optimizing the programming algorithm were the main methods used to improve the computational efficiency. The review suggests that the numerical model and related parameters could be improved by combining with actual working conditions such as non-constant currents or irregular waves at sea, the accumulation of catch in the codend, as well as the mechanical properties affected by the braided structure and non-linear deformation of the mesh. Moreover, numerical computation efficiency could be improved by the modification of solution algorithms, optimization of node topology, and improvement of calculation frameworks. In addition, the coupled motion and flow simulation of fishing gear, fishing methods, sea condition, and catches should be strengthened, providing an efficient approach for designing netting configurations, improving operational technology, and optimizing fishing gear hydrodynamics.

**Key words:** hydrodynamics; numerical simulation; numerical solution; fishing gear

**Corresponding author:** HUA Chuanxiang. E-mail: cxhua@shou.edu.cn