

文章编号: 1007-7294(2024)04-0606-20

面向船海水动力应用的势粘流 耦合方法研究综述

叶永林¹, 杨军城², 谢春梅^{2,3}, 孙鹏楠⁴

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;
3. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082; 4. 中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 将势流方法和CFD方法相结合的势粘流耦合方法, 在船舶与海洋工程领域的波浪演化、波浪与结构物相互作用等问题中逐渐受到关注。势粘流耦合方法在保证计算精度的同时可以有效降低数值模拟的计算成本, 使得实尺度的流固耦合精细模拟成为可能。本文对面向船舶与海洋工程水动力应用的势粘流耦合方法的发展和研究现状进行了总结, 通过区域分解和方程分解两类耦合方法展开论述, 分析其优势与面临的挑战。

关键词: 势粘流耦合; 区域分解; 方程分解

中图分类号: O352 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.04.012

Review of potential-viscous flow coupling methods for hydrodynamics of marine engineering

YE Yong-lin¹, YANG Jun-cheng², XIE Chun-mei^{2,3}, SUN Peng-nan⁴

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 3. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China; 4. School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: The potential-viscous flow coupling method, which combines the potential flow method with the CFD method, has gradually attracted attention in solving issues of wave evolution and wave structure interaction in marine engineering field. The potential-viscous coupling method can effectively reduce the computational cost of numerical simulation while ensuring the calculation accuracy, making it possible to achieve fine simulation of fluid-structure coupling on a real scale. In this paper, the state of art of the potential-viscous flow coupling method for marine engineering hydrodynamic applications are reviewed. Two types of coupling methods, domain decomposition and functional decomposition, are discussed to analyze advantages and challenges of the coupling method.

Key words: potential-viscous flow coupling; domain decomposition; functional decomposition

0 引 言

随着海洋资源的开发和利用, 船舶与海洋结构物逐渐面临更复杂的环境。为了海洋资源开发利

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 江苏省青年基金项目(BK20230183); 无锡市“太湖人才计划”; 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3306200)

作者简介: 叶永林(1974-), 男, 博士, 研究员; 杨军城(1999-), 男, 硕士研究生;
谢春梅(1991-), 女, 博士, 高级工程师, 通讯作者, E-mail: xiechunmei@cssrc.com.cn。

用的安全性和经济性,有必要对波浪与结构物的相互作用进行深入研究,以探究结构物在波浪作用下的运动规律,增强对波浪与结构物相互作用过程的理解和认识,进而为结构物的设计和建造提供理论支撑。

数值模拟作为波浪与结构物相互作用研究的一种重要手段,被广泛应用于船舶与海洋工程水动力研究。本文重点关注非线性波浪的生成和演化以及波浪与结构物相互作用两类问题的数值模拟方法。在数值模拟中,首先需要考虑非线性波浪的生成,长时间、大尺度的传播演化以及在波浪演化或与结构物作用过程中小尺度范围内可能发生的波浪破碎、空气卷吸等现象。此外,对于波浪与结构物相互作用问题,还需要考虑结构物壁面附近的流体粘性效应和有旋流动。要准确地对波浪与结构物相互作用问题进行模拟,需要考虑多尺度流动、非线性波浪、水气两相流以及粘性旋度等因素。

在粘性、旋度等因素可忽略时,波浪的生成和演化以及波浪与结构物的相互作用问题通常通过势流理论进行求解。缓坡方程模型^[1]、Boussinesq 模型^[2]和基于求解 Laplace 方程的非线性波浪模型^[3]等势流模型被用于研究波浪的生成和演化。从早期的切片理论^[4-5],到后续的边界元方法^[6-7]、水弹性理论^[8-9]等都基于势流理论对波浪中船舶和海上平台的动力响应进行分析。此外,许多势流模型已经发展出了非线性理论,能够处理弱非线性和部分非线性波浪载荷^[10-11]以及完全非线性波浪运动^[12]问题。理论上,在无粘无旋且不可压缩流体假设下,势流理论的控制方程由 Navier-Stokes(N-S)方程简化为 Laplace 方程。通过半解析的势流方法进行求解时,体问题被降阶为面问题,能极大减小计算量,且对于开放域问题有先天优势。同时,势流模型的数值耗散低,在对大尺度波浪的生成和演化这一类问题进行模拟时,计算精度和效率都较高。但是由于对流动的高度简化,势流理论无法解决复杂问题,如船舶的粘性阻力、涡激力、结构物周围的流动分离以及波浪破碎等。

CFD(Computational Fluid Dynamics)方法,主要通过求解 N-S 方程来模拟波浪与结构物相互作用问题。CFD 方法能够在模拟过程中考虑粘性、旋度以及湍流等,并且通过一些自由面捕捉方法如水平集方法^[13](Level Set Method,简称 LSM)、流体体积分数^[14](Volume of Fluid,简称 VOF)等可实现对两相流的模拟,因此采用 CFD 方法模拟波浪与结构物相互作用问题,能够更加精确地反映流动细节和结构物响应^[15-17]。相应地,CFD 方法相较于势流模型对计算资源的需求更大,当问题涉及的时空尺度较大且对精度要求较高时更是如此。同时,CFD 方法的数值耗散较大,不适合进行长时间、大尺度波浪问题的模拟。

Ransley 等^[18-19]的盲测中比较了几种 CFD 求解器和势流求解器对无破碎波浪与结构物相互作用问题的计算结果。在中等波陡波浪条件下,即使是最快的 CFD 求解器也比势流求解器慢 1.5 个数量级。但作者同时提出,如果势流理论的假设不再成立,即当波陡增大至波浪发生破碎时,只有使用 CFD 求解器才能很好地解决问题。

船舶与海洋工程水动力研究中所涉及的流动问题一般为高雷诺数流动,流体的粘性主要作用于结构物面附近的薄层——即边界层内部,而边界层外部的流动由于能量耗散,其旋度和粘性影响在远离近场时会逐渐减小直至消失,可近似为无旋理想流动。因此在靠近结构物的内域采用 CFD 方法求解,而在远离结构物的外域采用势流方法求解,从而通过不同的模型来更高效地模拟不同的物理现象是十分自然的想法,这是势粘流耦合方法的一类,称之为区域分解方法。同时,对于带有自由面的船海水动力问题,通常大量的计算来自于自由面的更新,此时将入射波或者整个势流部分利用势流方法求解,剩余部分利用 CFD 方法求解将大大提高计算效率,这也是常见的势粘流耦合方法之一,称之为方程分解方法。在过去的几十年间有诸多学者对势粘流耦合进行了探索和研究,发展了许多不同的模型和方法,并且已将这些方法应用到各类问题中。基于此,本文总结分析了上述两类势粘流耦合方法。

Robaux 等^[20]的研究结果表明区域分解方法和方程分解方法在计算精度和效率上相差无几。在他们的研究中,分别采用单向耦合的区域分解方法和方程分解方法对非线性波浪与固定潜体相互作用

的问题进行了数值模拟,并与 waveFoam 粘流求解器和 HPC 势流求解器的结果进行了对比。对比结果显示,两种方法计算的结构载荷和流场的速度场、涡量场等与 CFD 求解器的结果吻合良好,并且都能够将计算时长缩短至 CFD 计算时长的 1/8,有效地提高了计算效率。

本文旨在系统地归纳和总结现有的研究基础,针对波浪与结构物相互作用问题的数值模拟方法进行深入思考,对面向船舶与海洋工程水动力应用的势粘流耦合方法进行综述,从而为波浪与结构物相互作用数值研究的后续展开提供参考。本文第 1 章将对区域分解方法的发展和研究现状展开介绍,包括势粘流模型、耦合方法、流域划分和典型应用;第 2 章将介绍 Helmholtz 速度分解和 SWENSE 模型这两类方程分解方法;第 3 章给出了本文的结论。

1 区域分解方法

区域分解方法是最早被用于进行势粘流耦合研究的方法。自二十世纪初 Prandtl^[21]提出边界层理论以来,学者们对粘流和无粘流间的耦合展开了诸多研究。在边界层理论中,流体的粘性效应主要体现在边界层内部,而在边界层外部流动可近似视为无粘流或理想流动。与边界层理论类似,区域分解方法的基本思路是将流域划分为势流域 Ω_{PF} 和粘流域 Ω_{NS} ,在不同流域采用不同的模型进行求解,并在耦合区域 $\Omega_{Coupling\ domain}$ 或耦合界面 $\Gamma_{Coupling}$ 处进行耦合计算,以实现势流与粘流的耦合过程,如图 1 所示。

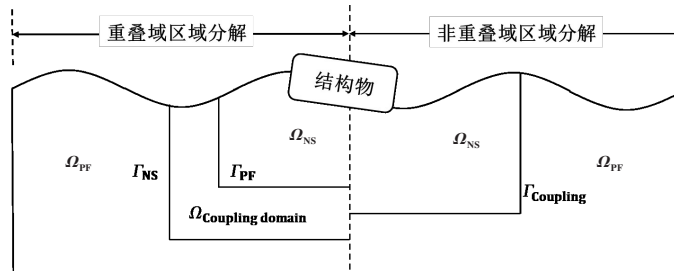


图 1 区域分解方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of domain decomposition method

根据前人的研究可知,区域分解方法的关键在于势粘流模型、耦合方式和流域划分这三个方面,下面将对此展开介绍。

1.1 势粘流模型

势流理论是基于不可压、无粘、无旋假设建立的,其控制方程为 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

粘流方法的基本控制方程为连续性方程和 N-S 方程:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{2}$$

$$\partial (\rho \mathbf{u}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \tag{3}$$

一般 CFD 方法为了减小计算量,多采用 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程进行求解,并结合湍流模型以提高模拟精度。

以往对区域分解方法的研究采用了许多模型,其中势流模型一般有波浪理论模型和势流数值方法,粘流模型包括无网格和有网格 CFD 方法,具体见表 1。

表 1 区域分解方法中的势粘流模型

Tab.1 Potential flow and viscous flow models in domain decomposition method

势粘流模型		方法类型
势流模型	势流波浪模型	Boussinesq 模型 ^[22-25] SWASH 模型 ^[26] (Simulating waves till shore model)

续表 1

势粘流模型		方法类型
势流模型	势流数值方法	边界元法 ^[27-38] (Boundary Element Method, 简称BEM)
		高阶谱法 ^[39-49] (High Order Spectral, 简称HOS)
		有限体积法 ^[50-51] (Finite Volume Method, 简称FVM)
		有限元法 ^[52-55] (Finite Element Method, 简称FEM)
		有限差分法 ^[56-57] (Finite Difference Method, 简称FDM)
		准拉格朗日欧拉有限元法 ^[58-63] (Quasi Lagrangian Eulerian Finite Element Method, 简称QALE-FEM)
		无旋层析水波理论 ^[64-65] (Irrotational Green-Naghdi, 简称IGN)
粘流模型	有网格 CFD 方法	FVM ^[20,23,28-33,35,38,40-44,46-52,54,56-60,64-67]
		FEM ^[36,37,52,53,68]
粘流模型	无网格 CFD 方法	光滑粒子流体动力学 ^[22,24,26,39,61-63] (Smoothed Particle Hydrodynamics, 简称SPH)
		Rankine 源无网格 Petrov-Galerkin 法 ^[69-70] (Meshless Local Petrov-Galerkin Method with Rankine Source, 简称MPLG_R)

常用的势流模型主要为 BEM 和 HOS 方法。BEM 作为一种半解析方法, 能够将体网格计算转化为面网格计算, 因此求解精度和计算效率都较高, 并且适合处理开放边界问题。HOS 方法作为一种伪谱法, 在数值计算中引入了快速傅里叶变换, 因此计算效率高且数值耗散低, 适合长时间大尺度的波浪演算。常用的粘流模型主要是 FVM, 该方法守恒性好, 网格对复杂几何区域的适应性强, 并可通过 VOF 模型追踪自由面实现两相流的求解。SPH 作为一种无网格方法, 得益于其拉格朗日和无网格粒子特性, 可自动追踪自由液面^[71], 并且精确满足质量守恒, 因而在砰击、上浪等强非线性自由面问题的势粘流耦合中也被广泛应用。

1.2 耦合方法

耦合方法是区域分解方法的研究重点。从势粘流域是否重叠考虑, 有重叠域耦合和非重叠域(即界面)耦合; 从耦合方向考虑, 可以分为单向耦合和双向耦合, 即势粘流域间的信息是单向传递还是双向传递, 也称为弱耦合和强耦合; 从匹配方式考虑, 主要有迭代匹配和松弛函数两种方法; 从匹配的边界条件考虑, 更是丰富多样, 例如速度势 Dirichlet 条件、速度法向分量 Neumann 条件等。值得注意的是, 对于船舶与海洋工程中的水动力问题, 由于自由面的存在, 不同区域匹配时所用的边界条件是耦合准确性和稳定性的关键。

最早区域分解方法被用于空气动力学的势粘流耦合研究^[52-53]。Dinh 等^[52-53]针对不可压粘性流问题, 按照距离物面远近将流域分为外部势流域和内部粘流域, 并在两者间保留有重叠区域。粘流域提供速度势作为势流域的 Dirichlet 边界条件, 势流域为粘流域提供速度边界条件, 子域间迭代运算至收敛, 收敛条件为重叠域内的势流速度势梯度和粘流速度满足最小二乘优化条件。在二维机翼绕流问题的计算中, 通过 FEM 对势粘流控制方程进行离散, 耦合方法的粘流域节点和单元数量相较于全粘流方法减少近 1/3, 计算给出的机翼表面压力分布、流线和涡量场也与后者吻合良好。不过由于收敛所需的迭代计算量并不小, 因此对计算效率的提高并不明显。

Campana 等^[27-28]将势粘流耦合方法引入至船舶水动力性能预报的研究中。与 Dinh 等^[53]的方法不同, Campana 等^[27]尝试取消势粘流重叠区域, 仅通过界面进行耦合。在界面处, 粘流域提供速度法向分量作为势流域的 Neumann 边界条件, 而势流域提供速度和压力作为粘流域边界条件。对定常流中几类船型的计算结果显示, 尽管能够收敛, 但收敛速度不是很理想, 并且在界面上观察到了非平滑过渡。因此 Campana 等^[28]将界面改为重叠区域, 势流域在粘流边界 Γ_v 仅提供速度作为边界条件, 而粘流域在势流边界 Γ_p 提供边界条件不变, 即

$$\mathbf{u}|_{\Gamma_v} = \nabla\phi|_{\Gamma_v}, \quad (\partial\phi/\partial\mathbf{n})|_{\Gamma_v} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_v} \quad (4)$$

采用该方法对几类船型进行模拟计算,给出的压力云图与全粘流方法和实验数据对照都吻合较好,而计算时间仅为全粘流方法的1/6。新方法提高了收敛速度,并保证了匹配面上的平滑过渡,但艏艉处的计算结果较差,实验中观察到的速度场S形轮廓并未出现。

进一步地, Iafrati 和 Campana^[30]针对界面耦合提出了新的耦合边界条件,并与 Campana 等^[28]的重叠域耦合方法进行了对比。势流域提供速度和压力边界条件,粘流域通过非稳态 Bernoulli 方程获得界面上的速度势,为势流域提供 Dirichlet 边界条件,在界面 Γ 上的边界条件如下:

$$\mathbf{u}_v = \nabla\phi, \quad p_v = p_p - 2\mu(\partial\mathbf{u}_n/\partial\mathbf{n}), \quad \phi = \int_0^t (\partial\phi/\partial t) dt = \int_0^t (-p_v/\rho - \mathbf{g} - |\mathbf{u}_p|^2/2) dt \quad (5)$$

新的界面耦合方法相较于重叠域耦合,收敛速度更快,但误差略大。采用该方法对浸没水翼产生的破碎波进行模拟,能够将粘流域大小缩小至计算域的30%。Zhang 等^[36-37]在 Iafrati 等^[30]的基础上提出了新的隐式迭代方法,并加入了自由面校正和不匹配网格插值,模拟的溃坝过程与实验吻合较为一致。

Hamilton 等^[68]将外域无粘自由表面流在圆柱界面上的广义解用“壳函数”(shell functions)表达,使界面上的速度和压力通过“壳系数”(shell coefficients)相关联。并且提出了一种新的“压力驱动”耦合方法,内域依赖外域在界面上提供压力以进行下一步计算。预求解并存储“壳系数”后,内域只需要提供界面处的速度,就能够通过“壳函数”获得外域在界面上的压力,达到一次求解、多次使用,从而实现更高效的界面耦合。对规则波圆柱绕流的模拟结果显示,耦合方法较势流方法计算的波浪力小。除了依靠显式传递边界条件实现势粘流耦合外, Kristiansen 等^[50]在势粘流域均采用 FVM 数值方法,并将粘流求解过程分解,从而能够在整场流域得到一个单一的方程组,隐式包含了势粘流域边界条件的交互。

上述的耦合方法主要通过势粘流域互相提供边界条件,子域内分别求解并迭代至收敛以实现耦合,属于双向耦合,也称之为强耦合,即势粘流域的流动会通过耦合过程相互影响。除了双向耦合以外,研究人员还提出了单向耦合方法。Guignard 等^[29]提出了基于速度压力传递的单向耦合方法,即势流域直接向粘流域传递速度和压力作为边界条件,而粘流域并不对势流域做出反馈,因此略去了双向耦合中的迭代过程,进一步提高了计算效率。但是在这一方法中,单向耦合使得粘流域在势粘流域的虚拟边界处产生反射波。Kim 等^[54]在势粘流域间设置了重叠的松弛区,其内的速度、水体积分数等变量 ϕ 的源项 S_ϕ 依照松弛函数 μ 由势流解和粘流解加权所得,越靠近粘流域则粘流解权重越大,反之亦然,其表达式如下:

$$S_\phi^* = S_\phi - \mu\rho(\phi - \phi_E) \quad (6)$$

因此当粘流域的波浪外传时,在松弛区内能够逐渐转化为势流解,有效减少了反射波。这种通过非物理手段实现耦合的方法比较适合单向耦合,不需要考虑粘流域对势流域的反馈。

孟巍等^[38]结合松弛函数^[56]和边界条件传递^[27]以实现双向耦合,即势流域向粘流域通过松弛函数传递波高和速度,而粘流域为势流域提供 Neumann 边界条件。通过该耦合方法实现的数值消波能够将粘流消波区减小为全粘流的1/5。钟文杰等^[57]采用了类似的方法,但松弛函数被用于粘流域向势流域传递波高和速度,而势流域在粘流域边界插值提供波高和速度条件。通过该方法实现的数值造波,能够在波浪传播接近粘流域入口时才开始粘流计算,进而节省计算时间。

上述耦合方法主要被用于波浪模型或势流数值方法等有网格 CFD 方法间的耦合,而关于无网格 CFD 如光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)的耦合方法也有一定的发展。Narayanaswamy^[22]采用类似重叠区域耦合^[28]的方式实现了 Boussinesq 波浪模型和 SPH 方法的耦合,对孤立波传播的模拟效果较好。Altomare 等^[26]设置了一组速度由 SWASH 模型提供的 SPH 粒子,其形状在每一时间步变化,起到“波浪桨”(wave paddle)的作用。通过这组“波浪桨”粒子与自由流体粒子相互作用而产生波浪,将势流域信息传递至粘流域中,实现了 SWASH 模型与 SPH 方法的单向耦合。该方

法对规则波近岸浅化的模拟与实验结果一致性较好。Oger等^[39]在每一时间步,使用HOS方法将速度和压力赋给势粘流重叠域内的粒子,随后这些“受迫粒子”与粘流域内的“自由粒子”共同参与SPH计算以实现耦合。这里与Altomare等^[26]的方法不同,粒子的类型会随着流入流出重叠区域而发生改变,而非是固定的一组粒子,因此可以直接模拟波浪的流动,而非通过波浪桨^[26]的移动产生波浪。

根据上述研究可知,耦合方法大致分为3类,表2中简单总结了几类常用耦合方法的部分特点,而边界条件的选取、耦合方向等方法细节在不同的研究中都有所不同,并且粒子法有特殊的耦合方法,这些都要视具体问题而定。总而言之,耦合方法的关键在于精确地在势粘流域间传递流场信息(如速度、压强和波高等),并且尽可能保证过渡区的平滑,解决在边界处可能出现的反射和发散等问题。

表2 几类常用耦合方法的特点

Tab.2 Characteristics of several commonly used coupling methods

耦合方法	简介	特点
重叠域迭代匹配	势粘流域互相在重叠域边界上提供边界条件,迭代计算至收敛	势粘流域间过渡平滑,耦合精度较高;收敛速度较慢,计算效率提高不大
界面迭代匹配	势粘流域在交界面处提供边界条件,迭代计算至收敛	收敛速度较快,计算效率提高较大;势粘流域间过渡有间断,耦合精度略低
重叠域松弛函数	通过重叠区域和松弛函数实现流场信息的传递	无需迭代计算,对计算效率提高较大,松弛函数避免了反射波;非物理的耦合方法

1.3 流域划分

流域划分主要涉及势粘流域边界划分、势粘流域是否重叠、耦合区域的大小和位置或耦合界面的位置这几个问题,其中重叠区域在耦合方法中已经介绍,不在此赘述。其中,势粘流域边界划分将影响进出口边界、自由液面、物面等边界条件的处理。

文献中流固耦合问题一般采用类似Campana等^[27]的处理方法,将流域划分为结构物近场的粘流域和远场的势流域,自由面在势粘流域中都有分布。与之不同的是将自由面只包含于势流域或粘流域,例如Iafrafi等^[30]为了捕捉产生的波浪破碎现象,将流域上下划分,自由液面被完全包含于粘流域中,而浸没水翼在势流域中;Kristiansen等^[50]将自由液面完全置于势流域内,仅将结构物底部发生流动分离的区域部分划为粘流域,因此他们的方法难以解决强非线性自由面问题。

对于波浪生成和演化的流域划分,现有的研究主要关注强非线性自由面现象和数值水池造波两类。对于强非线性自由面问题,粘流域一般将强非线性现象发生的区域包含在内,如Guignard等^[29]和Zhang等^[36-37]。对于数值水池造波问题,一般将势流域分布在粘流域的进出口以实现耦合造波或消波,如Baquet等^[55]和孟巍等^[38]。

耦合区域的大小和位置或耦合界面的位置对于区域分解方法是一个较为复杂的问题,既要尽可能减小粘流域尺寸以提高计算效率,又需要保证粘流域的大小足以准确反映流动的粘性效应和强非线性现象等,并且需要考虑辐射波、绕射波的充分演化。Campana等^[28]对定常流中的S60船型进行模拟,分别将耦合区域设置在船长的1/20和1/100处,其波高计算结果差距不大,这可能是由于问题的非线性和粘性效应较弱。Iafrafi等^[30]对重叠域耦合的耦合区域宽度和界面耦合的界面位置都做了一定研究。当耦合区域的宽度较大时,不仅精度提高,收敛速度也有所增加。耦合界面的位置对速度结果影响较小,对波高几乎没有影响,这可能是由于界面位置使粘性效应基本被包含于粘流域内。

Kim等^[35]针对BEM-FVM双向耦合方法,分析了耦合区域的宽度以及到结构物的距离对计算的影响。耦合区域宽度对波浪的计算结果影响并不大,并且除了波陡最小的一组实验外,耦合方法的误差普遍小于全粘流方法。耦合区域到结构物的距离对一阶波浪力影响不大,当距离为0.2倍和0.4倍波长时二阶波浪力有较大差异,但当距离大于0.8倍波长时影响基本上消失。

Zhuang等^[49]对基于松弛函数耦合的HOS-CFD单向耦合进行了较为丰富的参数化分析,其中也讨论了粘流域大小对计算的影响。通过对比三种大小的粘流域计算结果可以知道,当粘流域较小时船

体周围的散射波无法充分演化,并且会出现更严重的反射波。

1.4 典型应用

在使用区域分解方法对船舶与海洋工程水动力问题进行研究时,需要针对不同问题,采用合适的耦合方法和势粘流模型,以发挥势粘流耦合方法高效准确的优势。根据现有的研究,主要可以分为波浪生成演化和波浪与结构物相互作用这两大类问题。

1.4.1 波浪的生成和演化

对波浪的生成和演化的研究主要包括波浪破碎和强非线性数值水池造波消波过程等势流模型无法解决的问题。Drevar等^[33]采用类似1.2节中Guignard等^[29]的方法对二维孤立波跨越台阶破碎以及近岸波浪破碎和波浪破碎后演化进行了模拟,数值结果表明势粘流方法能够有效减少波浪发生破碎之前在粘流域内的耗散,与实验结果吻合良好。Iafrafi等^[30]对流过不规则池底的二维非破碎波和浸没水翼绕流产生的二维破碎波进行了模拟,前者与实验和全粘流数值模拟结果基本一致,如图2所示,后者将粘流计算域减小至30%,并反映出了自由液面破碎的细节。Baquet等^[55]主要研究了基于单向耦合的完全非线性数值水池,进行了长达三小时的完全非线性二维不规则波演化模拟,与目标谱吻合较好,但长时间演化后数值耗散增加。Zhang等^[36]模拟了溃坝波和孤立波传播,如图3所示,后拓展到三维楔形盆地上的孤立波演化和破碎^[37],准确预测了破浪破碎点的位置,并且波高、速度等计算结果与实验基本吻合。宋家琦等^[44-45]在极端波浪的数值模拟中采用了HOS-CFD单向耦合,对二维、三维规则波和不规则波等进行了计算,与全CFD结果吻合良好。孟巍等^[38]和钟文杰等^[57]分别实现了基于势粘流双向耦合的数值消波和造波,前者大幅减小了粘流消波区的大小,后者能够减小粘流计算域,节省计算消耗。

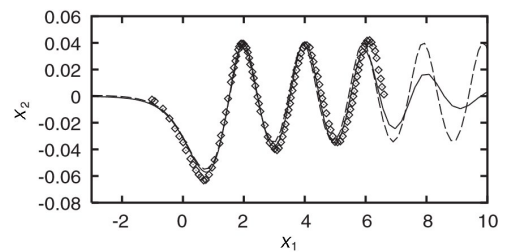


图2 流过不规则池底的二维非破碎波波高图^[30]: 耦合方法(实线)、边界元法(虚线)和实验结果(点)对比

Fig.2 Wave height of the wavy flow generated by a bottom bump^[30]: Comparisons among the coupling method (solid line), the BEM (dashed line) and the experiment result (dots)

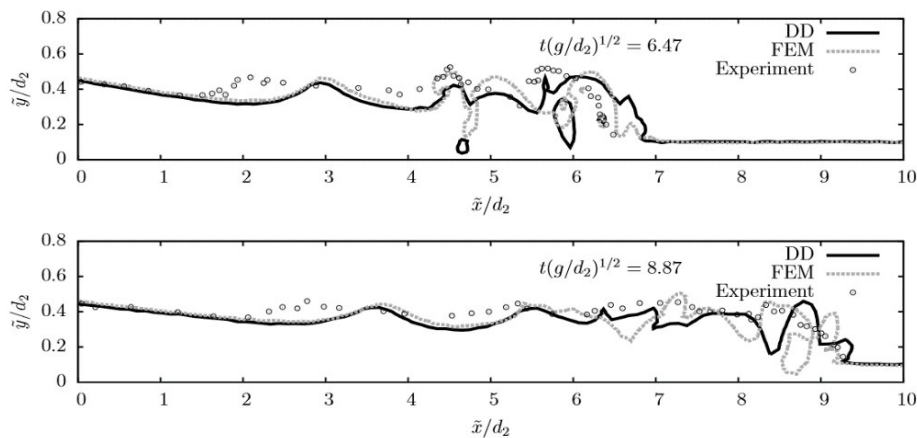


图3 溃坝波轮廓图^[36]:耦合方法、全粘流法和实验结果对比

Fig.3 Profile of the dam break wave^[36]: Comparisons among the coupling method, the FEM and the experiment result

1.4.2 波浪与结构物相互作用

对波浪与结构物相互作用问题的研究则更为丰富,在1.2节的耦合方法中已经介绍了一部分,在此不再赘述。区域分解势粘流耦合方法对波浪与结构相互作用问题的研究主要针对结构在非线性波浪中的运动响应以及高阶波浪力等。

Campana等^[28]对定常波浪中的几类船型进行模拟计算,给出的压力等值线与全粘流方法和实验数据对照都吻合较好,如图4所示,并且计算时间仅为全粘流方法的1/6。Colicchio等^[34]将BEM法与采用

LSM法的N-S求解器耦合,首先对溃坝问题进行了有效性验证和收敛性分析,结果表明该方法能够很好地捕捉界面的大变形和断裂,而后对船舶甲板上浪问题进行了研究,模拟的甲板上浪剖面与实验结果吻合良好。不过在相同网格精度下,耦合方法每时间步的CPU耗时为全粘流法的3/5,对计算效率提高并不显著。Kim等^[54]研究了破碎波对三维竖直圆柱造成的激振载荷。他们的数值结果表明破碎波工况下,波高增加25%会导致激振载荷增加100%,远高于非破碎波。Kristiansen等^[50]采用全FVM法实现了势粘流耦合,并对几类双体刚性连接体(类似双体船)的强迫垂荡运动进行了模拟,结果与二维模型试验基本吻合。Paulsen等^[56]分别计算了三维竖直圆柱在弱非线性规则波、聚焦波、单向不规则波和多向不规则波下的载荷响应,即使是在最复杂的倾斜池底多向不规则波模拟中,结果也与实验基本吻合,如图5所示。对于不同类型的工况,耦合方法在计算效率上有不同程度的提高。Oger等^[39]通过HOS-SPH单向耦合对三维浮式平台的砰击上浪问题进行了模拟,如图6所示,数值结果对波浪的反映基本精确,但是未能准确获取波浪冲击结构底部的压力,尤其是砰击压力峰值,这可能是由于粒子分辨率不够精细。Lu等^[51]采用全FVM方法的双向耦合,对半潜式平台下沉的整个过程进行了模拟,展现了耦合方法能够为复杂海洋工程问题的数值模拟提供一种更为简化和灵活的处理方式。赵彬彬等^[64-65]基于单向耦合方法对直立圆柱波浪爬升和船舶波浪增阻进行了模拟,在相同网格精度下,耦合方法的网格数量约为全粘流方法的2/3。在船舶波浪增阻计算中,增阻、垂荡和纵摇等结果与实验吻合良好,并且可以将计算

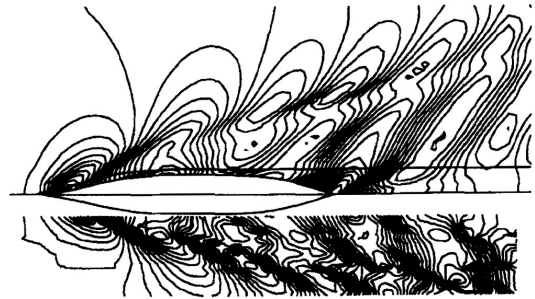


图4 S60船近场自由面等高线^[28]:耦合方法解(上半)和实验结果(下半)对比

Fig.4 Free surface elevation^[28]: Comparison between coupling method (top half) and experiment result (bottom half) for S60

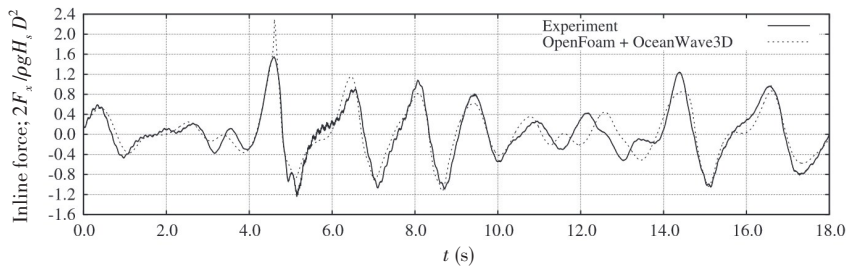


图5 竖直圆柱所受x方向力^[56]:耦合方法(虚线)和实验结果(实线)对比

Fig.5 Inline force on the cylinder^[56]: Comparison between coupling method (dashed line) and experiment result (solid line)

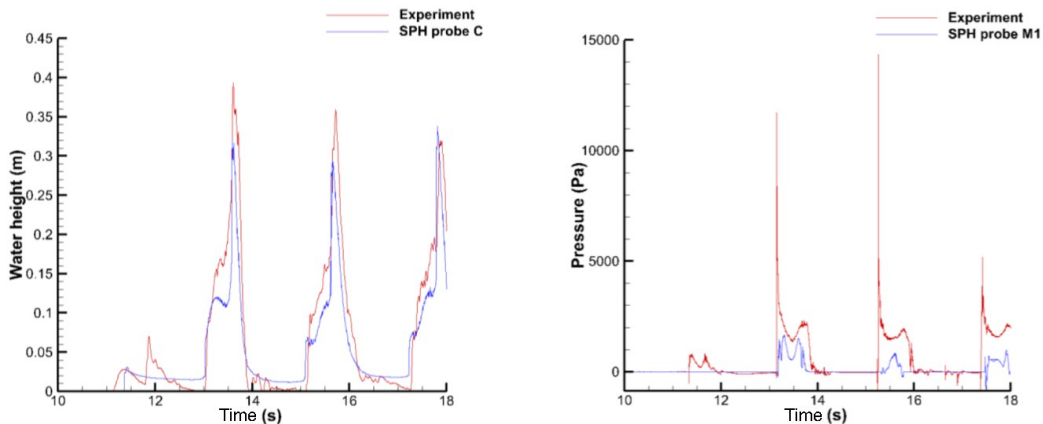


图6 Oger等^[39]开展的三维浮式平台砰击上浪模拟及验证:波高结果(左)和压力结果(右)

Fig.6 Simulation and verification of three-dimensional floating platform slamming^[39]: Wave height (left) and pressure (right)

时间缩短至全粘流方法的1/3。庄园等^[72]采用HOS-CFD耦合算法,开展了6750 TEU集装箱船在大范围海域波浪中运动的模拟,与法国南特中央理工LHEEA实验室Horel等^[73]的实验结果吻合良好,如图7所示,体现了粘势流耦合算法计算多尺度耦合问题的能力。

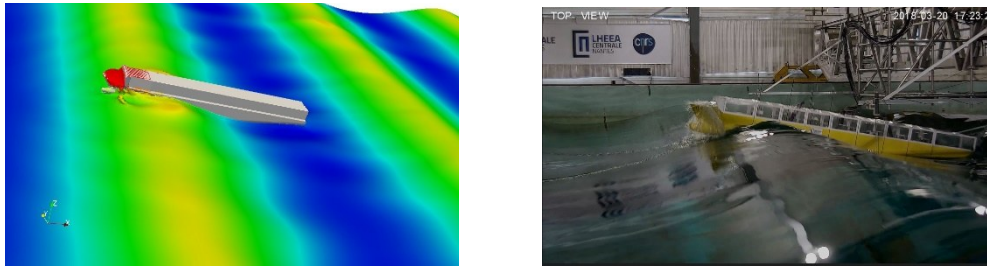


图7 庄园等^[72]开展的6750 TEU集装箱船波浪中运动模拟及验证:HOS-CFD计算结果(左)和实验结果^[73](右)

Fig.7 Motion simulation and verification of 6750 TEU containership in waves^[72]:

Coupling method (left) and experiment result^[73] (right)

1.5 小结

区域分解方法通过将流域划分为不同子域,在子域内采用合适的模型进行求解,并通过重叠区域或界面实现子域间的信息匹配。因此对于区域分解方法来说,关键在于针对不同的问题和感兴趣的部分选择合适的耦合方法和势粘流模型。例如,对于波浪与结构物相互作用的问题,如果主要关心结构物的动力响应而忽略流场的细节,一般选择单向耦合。近几年研究者们倾向于采用松弛函数的耦合方法,而非通过迭代运算进行匹配耦合。这样做的好处是能够大幅减少计算量,避免了子域内重复的迭代运算,但是需要采取一定的手段以避免计算结果发散。此外,研究人员们对势粘流模型的选择十分多样,不同类型的问题需要选择合适的势粘流模型进行组合求解。

总的来说,基于区域分解的势粘流耦合方法经过一段时间的探索,已经在许多工程问题中得到了检验,表3中尽可能地列出了这些工作。在数值模拟中采用合适的耦合方法,能够在保证求解精度的前提下有效减少计算资源消耗,提高计算效率。现有的一些研究表明,在同等精度下耦合方法所耗计算时间能够减小至全粘流法的1/3^[64]、1/6^[28]甚至1/8^[20]。波浪结构物相互作用的盲测试验系列^[18-19]中也采用了几类耦合方法,在计算效率上可以体现出相较于粘流方法的优势。不过耦合方法对计算效率的提高程度受许多方面的影响,如问题规模、非线性强度、耦合方式和并行策略等,还需进一步地探索。

表3 区域分解方法研究进展

Tab.3 Research progress of domain decomposition method

代表性研究	势粘流边界条件		势流 求解器	粘流		应用问题
	势流 \longleftrightarrow 粘流	ϕ_n		求解器/自由面技术		
Dinh 等 ^[52-53] (1988)	u	ϕ	FEM	FEM	—	机翼绕流(2D)
Campana 等 ^[27] (1994)	u, p	ϕ_n	BEM	FVM	—	定常流中几类船型的响应(3D)
Campana 等 ^[28] (1995)	u	ϕ_n	BEM	FVM	—	定常流中几类船型的响应(3D)
Guignard ^[29] (1999)	u, p	—	BEM	FVM	VOF	近岸波浪浅化、破碎(2D)
Iafrazi 等 ^[30] (2003)	u, p	ϕ	BEM	FVM	—	浸没水翼产生破碎波(2D)
Lachaume ^[31] (2003)	u, p	—	BEM	FVM	VOF	斜坡上孤立波的演化(2D)
Biausser ^[32] (2004)	u, p	—	BEM	FVM	VOF	孤立波浅滩破碎(2D、3D)
Dreverd 等 ^[33] (2005)	u, p	—	BEM	FVM	VOF	孤立波跨越台阶破碎、浅滩破碎(2D)
Colicchio 等 ^[34] (2006)	u, p, η	ϕ_n, p, η	BEM	FDM	LSM	溃坝、甲板上浪(2D)
Narayanawamy ^[22] (2008)	u	u, η	Boussinesq 模型	SPH	—	孤立波恒定水深传播(2D)
Christensen 等 ^[23] (2009)	u, η	—	Boussinesq 模型	FVM	VOF	不规则波单桩载荷(3D)
Kim S 等 ^[35] (2010)	u, η	ϕ_n, η	BEM	FVM	VOF	规则波、随机波的传播和壁面反射(2D)

续表3

代表性研究	势粘流边界条件		势流 求解器	粘流		应用问题
	势流	←→粘流		求解器/自由面技术		
Hamilton 等 ^[68] (2011)	p	u	BEM	FEM	—	规则波传播、单桩载荷(3D)
Kassiotis 等 ^[24] (2011)	u, η	—	Boussinesq 模型	SPH	—	规则波传播与防波堤作用(3D)
Kim J 等 ^[54] (2012)	u, α	—	FEM	FVM	VOF	不同波浪下单桩激振载荷(3D)
Kristiansen 等 ^[50] (2012)	ϕ	p	FVM	FVM	—	双体结构强迫垂荡(2D)
Hildebrandt 等 ^[67] (2013)	u, p	—	FEM	FVM	VOF	波浪冲击三角架结构(3D)
Paulsen 等 ^[56] (2014)	u, α	—	FEM	FVM	VOF	不同波浪下竖直圆柱响应(3D)
Altomare 等 ^[26] (2014)	u	—	SWASH	SPH	—	近岸波浪浅化(2D)
Oger 等 ^[39] (2014)	u, p	—	HOS	SPH	—	FPSO 模型甲板上浪(3D)
Zhang Y 等 ^[36-37] (2015)	u, p	ϕ	BEM	FEM	LSM	溃坝、孤立波传播和浅滩破碎(2D、3D)
Nelli 等 ^[40] (2017)	η	—	HOS	FVM	VOF	波浪与系泊薄浮板作用(3D)
Lu 等 ^[51] (2017)	u, η	ϕ_n, η	BEM	FVM	VOF	波浪浅化、浮式平台下沉(2D、3D)
Choi 等 ^[42] (2018)	u, α	—	HOS	FVM	VOF	规则波、不规则波、极端波浪生成 (2D、3D)
赵彬彬等 ^[64-65] (2019)	u, α	—	IGN	FVM	VOF	KCS 波浪增阻、直立圆柱波浪爬升(3D)
Sriram 等 ^[69] (2020)	u, p	ϕ	FEM	IMLPG_R	—	波浪传播、孤立波越过海堤(2D)
Li Q 等 ^[58-59] (2018)	u, p, η	—	QALE-FEM	FVM	VOF	聚焦波与FPSO 结构作用(3D)
Yan 等 ^[60] (2019)	u, p	ϕ	FEM	MLPG_R	—	波浪爬升、近岸破碎(2D)
Wang 等 ^[66] (2020)	u, p	—	QALE-FEM	FVM	VOF	波浪与波浪能装置作用(3D)
Zhang N 等 ^[61-63] (2021)	u, p	—	QALE-FEM	SPH	—	波浪与浮体、波浪能装置作用(3D)
宋家琦等 ^[44] (2019)	u, α	—	HOS	FVM	VOF	规则波、不规则波、极端波浪生成 (2D、3D)
庄园等 ^[41,46,49] (2021)	u, α	—	HOS	FVM	VOF	波浪生成、波浪与单桩作用、KCS 波浪增阻、波浪中FPSO 船液舱晃荡(2D、3D)
韩勃等 ^[43,48] (2021)	u, α	—	HOS	FVM	VOF	直立圆柱波浪爬升(3D)
孟巍等 ^[38] (2022)	u, η	u	BEM	FVM	VOF	数值消波(2D)
钟文杰等 ^[57] (2022)	u, η	ϕ, η	FDM	FVM	VOF	数值造波(2D)
Robaux 等 ^[20] (2022)	u, p	—	HPC	FVM	VOF	波浪与固定潜体作用(2D)
Agarwal 等 ^[74] (2022)	u, p	—	FEM	MLPG_R	—	直立圆柱波浪爬升(3D)
Saincher 等 ^[75] (2022)	u, p	—	FEM	FVM	VOF	固定/移动圆柱波浪爬升(3D)
郭浩等 ^[76] (2023)	u, α	—	HOS	FVM	VOF	KCS 波浪增阻(3D)

2 方程分解方法

除了将流域在空间上划分为不同区域外,还有学者提出了对控制方程进行分解的方法。方程分解方法虽然是从流动控制方程中将势流部分解耦,但是其能够减小计算成本的原因还是由于粘性效应主要集中在物面附近或者将势流部分去除入射波之后的流场波面只在结构物周围有比较大的波动,因此粘流模型仅在近场需要分布密网格,而在远场可以采用粗网格以减小计算消耗。方程分解方法主要有两种:一是基于 Helmholtz 速度分解的控制方程分解,二是基于 SWENSE(Spectral Wave Explicit Navier–Stokes Equations)模型的方程分解,下面将对其分别介绍。

2.1 Helmholtz 速度分解

Kim 等^[77]基于 Helmholtz 速度分解(如图8所示)将满足 N-S 方程的整场速度分解为势流项 u_p 和互

补项 u^* ,

$$u = u_p + u^*, \quad u_p = \nabla\phi \tag{7}$$

将压力场进行同样的分解,进而推导出互补RANS方程:

$$\begin{aligned} \partial u^* / \partial t + (u^* \cdot \nabla) u^* + (u^* \cdot \nabla) u_p + (u_p \cdot \nabla) u^* = \\ -\nabla p^* + \nabla^2 u^* / Re \end{aligned} \tag{8}$$

在互补RANS方程中,既包含势流项也包含粘流项,并且粘流项在远场中快速耗散,因此能够减少计算量。该耦合模型需要首先对势流部分求解,然后将势流解代入互补RANS方程,进而求解获得整场解。Kim等^[77]通过对空气动力学中的二维平板流、方形管道流动和机翼绕流进行数值模拟,并且与实验结果和传统RANS求解器结果进行对比,验证了该方法的有效性和准确性,二维平板流结果如图9所示。

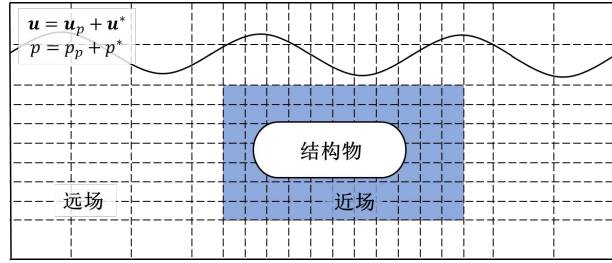


图8 Helmholtz速度分解示意图

Fig.8 Schematic diagram of Helmholtz velocity decomposition method

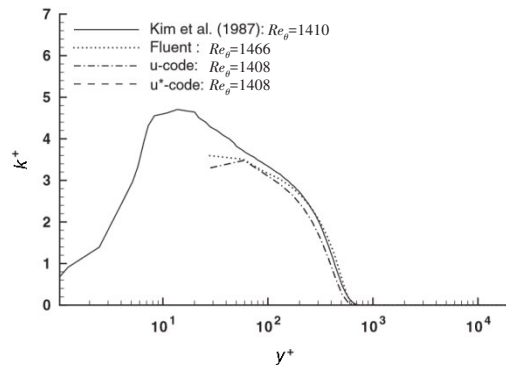
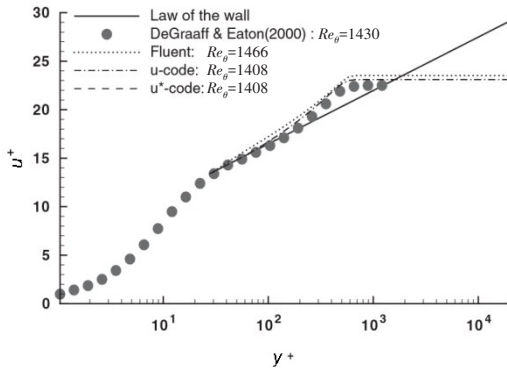


图9 二维平板流^[77]平均流向速度(左)和湍流动能(右):耦合方法、全粘流方法和实验结果对比

Fig.9 Mean streamwise velocity (left) and turbulent kinetic energy (right) of the turbulent flow over the flat plate^[77]:

Comparison among the coupling method, full viscous solution and experiment results

Hafez等^[78]通过修正Bernoulli方程求得势流压力,并将其代入粘流方程求解。使用该方法分别对中等雷诺数不可压条件下定常和非定常的二维翼型绕流进行了计算,结果与全粘流方法吻合较好。上海交通大学的赵骥、朱仁传等^[79-81]使用该方法首先实现了二维圆柱绕流的耦合,并在此基础上推广至三维,实现了三维潜体绕流的耦合计算。最后使用该方法计算了Wigley船的航行阻力,其中兴波阻力通过势流方法求解,而粘性阻力使用势粘流耦合方法求解获得,计算结果与实验和文献数据吻合较好。

Edmund等^[82]同样将整场速度分解为势流项和互补项,并对粘流域进行了截断,势流域为粘流域提供边界条件。但势流模型需要求解包含物面边界的Laplace方程,并通过迭代计算以满足势粘流解的收敛性和一致性。研究中对二维翼型绕流、圆柱绕流以及三维潜体湍流进行了模拟,与全粘流方法和实验结果吻合良好,并且实现了粘流计算域的缩减,部分结果如图10所示。Rosemurgy等^[83]将该方法推广到定常自由表面流动,并通过模拟流过池底凸起结构的定常自由面流验证了其有效性。Chen等^[84]发展了这种方法的非定常自由表面流动形式,并将其进一步推广到三维并应用于Wigley船型的湍流模拟,相较于全粘流方法提高了近50%的计算效率。

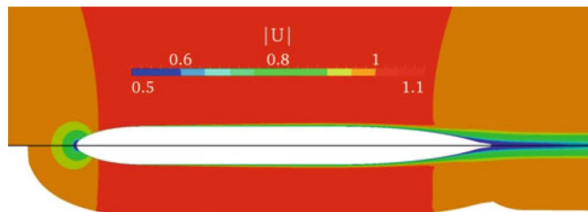


图10 二维潜体湍流速度场^[82]:全粘流方法(上)和耦合方法(下)对比

Fig.10 Turbulent velocity field around two-dimensional submerged body^[82]: Comparison between full viscous solution (top half) and coupling method (bottom half)

Zhang^[85]采用了类似Kim等^[77]的方法对速度进行分解,并通过两相流 Euler 求解器求解势流部分。值得注意的是,结构物在势流域中也存在,并且绕射波、辐射波等由欧拉方程求解。势流解通过松弛区域单向传递至粘流域,在这点上该方法与区域分解方法有相似之处。在他们的研究中,对复杂海底地形下的二维波浪结构物作用问题进行了模拟,与全粘流方法和实验结果基本一致,并且计算耗时能够节省 50% 甚至 85%。

由互补 N-S 方程求得的互补项中所包含的粘性效应,如果在实际计算中不加以处理,其衰减并不快。同时,在耦合计算中所有的粘流离散点都需要赋予势流解,因此对计算成本的减小并不显著。而 Edmund^[82, 86-87]的方法虽然对粘流域进行了截断,但需要进行迭代运算,因此相比于 Kim 等^[77]的方法计算量更大。此外,在面对如波浪破碎等复杂的两相流问题时,进行速度分解是有困难的,因此 Helmholtz 速度分解法暂时只被用于较为简单的势粘流耦合研究。

2.2 SWENSE 模型

船舶和海洋工程相比其他领域而言,自由面的存在是其一大突出特点,自由面的模拟增加了数值计算成本。基于此,研究人员提出了 SWENSE 模型,其最初是由 Ferrant 等^[88-89]提出,其基本思想是将速度、压力和自由面高度等分解为入射项和其他剩余项,如图 11 所示。其表达式如下:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_i + \mathbf{u}_D, \quad p = p_i + p_D, \quad \eta = \eta_i + \eta_D \tag{9}$$

并推导得到修正的 N-S 方程:

$$\partial \mathbf{u}_D / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}_D - \nu \nabla^2 \mathbf{u}_D + \nabla p_D / \rho = -(\mathbf{u}_D \cdot \nabla) \mathbf{u}_i + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_i \tag{10}$$

质量守恒方程和运动学、动力学自由面条件为

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_D = 0 \tag{11}$$

$$\partial \eta_D / \partial t + (\mathbf{u}_D \cdot \mathbf{i})(\nabla \eta_i \cdot \mathbf{i}) + (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i})(\nabla \eta_D \cdot \mathbf{i}) = \mathbf{u}_D \cdot \mathbf{j} \tag{12}$$

$$p_D = \rho g \eta_D + 2\rho \nu (\nabla \cdot \mathbf{n})(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \tag{13}$$

$$(\mathbf{n} \cdot \nabla)(\mathbf{u} \cdot \mathbf{t}) + (\mathbf{t} \cdot \nabla)(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) = 0 \tag{14}$$

以上这一组方程即为 SWENSE 方程组。其中,入射项由势流方法求解给出,而剩余项由 SWENSE 粘流求解器获得。在求解过程中,每一时间步内先由势流方法求解给出入射波,然后粘流求解器根据入射波求解辐射、绕射和粘性流动等问题。这是一种基于方程分解的单向耦合,粘流模型对势流没有反馈。

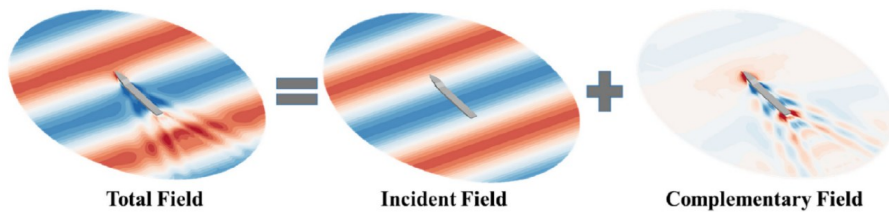


图 11 SWENSE 模型示意图^[104]

Fig.11 Schematic diagram of SWENSE model^[104]

Luquet 等^[90-91]和 Alessandrini 等^[92]通过 HOS 方法给出入射波,对 Wigley 船在规则波中的二自由度运动以及固定半潜式平台在聚焦波中的载荷响应进行了全尺度模拟。Wigley 船的垂荡和纵摇运动以及平台的载荷计算结果均与实验一致。Monroy 等^[93]使用该方法计算了重吊船在规则波和不规则波浪工况下的垂荡和纵摇响应,并进行了模型实验,其结果进一步验证了此数值方法的准确性。

早期的 SWENSE 模型未采用自由面捕捉技术,在解决自由面大变形、波浪破碎等复杂的两相流问题上较为困难。Reliquet 等^[94-95]采用交错网格布置,配合 LSM 方法实现了两相流求解。采用该方法对静水和迎浪中船舶的模拟结果^[94]与实验结果对比良好。如图 12 所示,对不同傅汝德数下的双体船进行耐波性计算^[95],其结果与全粘流方法以及实验结果吻合较好。进一步地,Vukčević 等^[96]针对扰动波反射问题,在 SWENSE 求解器中添加了隐式松弛区域。类似地,他们的研究中也采用了 LSM 方法对自

由面进行捕捉,模拟了二维数值水池和竖直圆柱的高阶波浪力。其数值结果与实验和文献结果吻合良好,并对计算中的波浪条件、离散条件等进行了分析。Gatin等^[97]采用Vukčević^[96]的方法模拟了三维实尺度集装箱船遭遇极端波浪的运动。在此工况下,船体出现了大幅横荡和横摇运动,并且捕捉到了上浪现象。除了LSM方法以外,Li等^[98-99]将VOF方法引入SWENSE模型以实现两相流求解。通过对二维数值水池以及规则波中竖直圆柱的计算,验证了该方法的有效性和准确性,如图13所示。此外,Li等^[100]还模拟了规则波、不规则波工况下的固定CALM浮标模型,与全粘流方法和实验结果对比显示,在相同网格数下耦合方法精度好于全粘流方法,而在相同精度要求下其计算效率也高于后者。

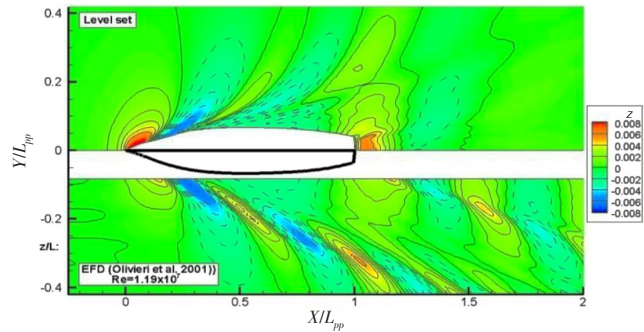


图12 船体近场自由面高^[94]:耦合方法(上半)与实验结果(下半)对比

Fig.12 Surface elevation around hull^[94]: Comparison between coupling method (top half) and experimental results (bottom half)

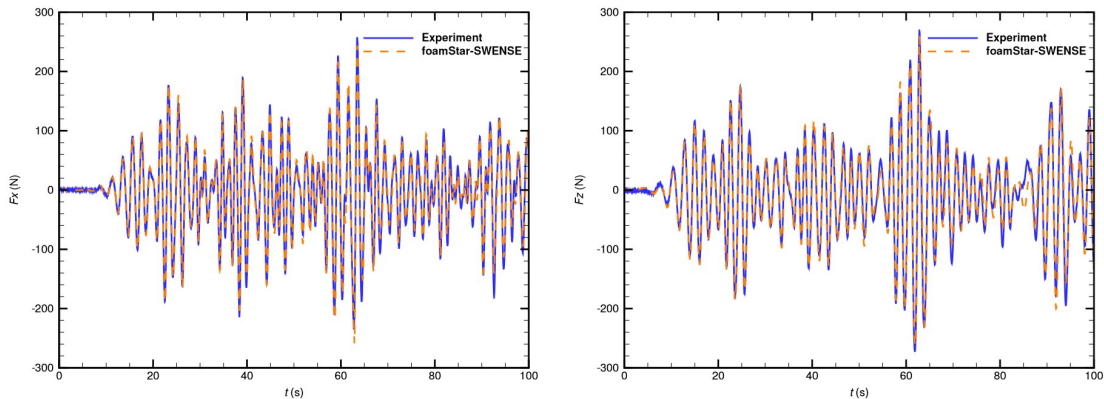


图13 CALM浮标波浪载荷^[98]:水平波浪力(左)和竖直波浪力(右),耦合方法与实验结果对比

Fig.13 Horizontal (left) and vertical (right) wave force in irregular waves of CALM buoy:

Comparison between coupling method and experimental results

SWENSE模型是目前较为成熟的势粘流耦合方程分解方法。由于SWENSE边界无需施加入射波条件,因此能够有效地降低方程组边界条件的复杂度,在保证精度的前提下提高计算速度。并且经过不断发展,该方法能够解决的问题类型也越来越丰富。但是SWENSE求解器的开发和优化难度较大,并且面对不合适求解的问题时修改的灵活性较差。

2.3 小结

方程分解方法从流动控制方程中解耦出势流部分,采用势流方法对其独立求解,再将势流部分代入互补N-S方程求解以实现耦合。Helmholtz速度分解方法将流动分解为势流项和剩余项,因此辐射、绕射等问题一般由势流求解,而粘性、湍流等由互补N-S方程求解。而SWENSE模型将流动分解为入射项和剩余项,其中入射项通过势流求解给出,因此辐射、绕射以及粘性和湍流等问题均由SWENSE求解器解得。

方程分解方法对船舶耐波性、波浪力计算等问题的解决比较成熟,在保持精度的前提下能够有效提高计算效率,或者在同等计算资源下能够提高求解精度。虽然在两相流问题的解决上已经有很大进步,但是面对自由面大变形甚至波浪破碎等复杂问题时求解仍然困难。在此,我们将方程分解方法的研究进展进行总结,如表4所示。

表4 方程分解方法研究进展

Tab.4 Research progress of functional decomposition method

分解模型	研究人员	自由面技术	应用问题
Helmholtz 速度分解	Kim K 等 ^[77] (2005)	—	平板流、方形管道流、机翼绕流(2D)
	Hafez 等 ^[78] (2007)	—	机翼绕流(2D)
	Edmund 等 ^[82] (2013)	—	二维翼型和圆柱绕流、潜体湍流(2D、3D)
	Rosemurgy 等 ^[83] (2012)	—	流过池底凸起结构的定常自由面流(2D)
	Chen 等 ^[84,101] (2016)	—	有限长平板层流、Wigley 船湍流(3D)
	Zhang X ^[85]	两相欧拉求解器/VOF	复杂海底地形波浪结构物作用(2D)
SWENSE 模型	Ferrant ^[88-89] (2003)	—	规则波与固定方形潜体作用(2D)
	Luquet 等 ^[90-91] (2007)	—	Wigley 船二自由度运动、聚焦波与固定
	Alessandrini 等 ^[92] (2008)	—	半潜式平台作用(3D)
	Gentaz ^[102] (2008)	—	波浪中的竖直圆柱(3D)
	Monroy 等 ^[93] (2010)	—	重吊船在波浪中的二自由度响应(3D)
	Reliquet 等 ^[94] (2013)	LSM	静水和迎浪中的船舶(3D)
	Reliquet 等 ^[95] (2019)	LSM	不同傅汝德数下双体船的耐波性(3D)
	Vukčević 等 ^[96] (2016)	LSM	二维数值水池、竖直圆柱高阶波浪力(2D、3D)
	Gatin 等 ^[97]	LSM	实尺度集装箱船遭遇极端波浪(3D)
	Li Z 等 ^[98-100] (2021)	VOF	二维数值水池、规则波中的竖直圆柱、不同 工况下的固定 CALM 浮标模型(2D、3D)
Aliyar ^[103] (2022)	VOF	圆柱波浪爬升、浮式风机波固耦合(3D)	
Yu 等 ^[104] (2022)	LSM	有/无航速典型船舶在波浪中的动力响应(3D)	

3 结 语

本文主要介绍了面向船舶与海洋工程水动力应用的势粘流耦合方法的发展和研究现状。势粘流耦合方法相较于传统的 CFD 方法主要具有以下优势:(1) 粘流计算域/网格量的减小极大地降低了计算成本;(2) 波浪的长时间大尺度生成和演化由势流方法完成,保证了波浪模拟的精度和效率;(3) Helmholtz 速度分解方法、SWENSE 模型等方程分解方法可以量化分析势流部分和粘流部分对流场以及结构载荷的影响。

从势流和粘流的耦合方法上来说,区域分解方法是通过纯数值的手段在空间区域内将二者耦合,而方程分解方法从流动控制方程上将二者解耦并实现耦合。从耦合方法的效率和准确性来说,两种方法都能够满足要求,但是区域分解方法的耦合方式和求解器的选择更加多样。同时,出于同样的原因,区域分解方法在开发耦合算法时需要十分谨慎,否则子域间的信息传递和耦合运算难以保证稳定性和准确性。而方程分解方法对于部分问题比较成熟,可以较好地求解,但是其求解器的可变性较差、程序可移植性差,对于不适合求解的问题可变性较差,不像区域分解方法那样可以灵活应对。

针对船舶与海洋工程水动力研究中各类复杂的多尺度问题,未来的势粘流耦合研究可能会更倾向于选择区域分解方法,耦合方法则是实现精确模拟的关键核心。并且为了在保证计算精度的前提下尽可能地减小计算成本,对不同类型的工程问题选择合适的耦合模型和求解器来开发耦合程序是十分必要的,这也是未来在工程应用的背景下开展势粘流耦合研究的必然趋势。

参 考 文 献:

- [1] Berkhoff J C W. Computation of combined refraction-diffraction[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1972, 1(13): 471-490.

- [2] Peregrine D H. Long waves on a beach[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967, 27(4): 815–827.
- [3] Longuet H M S, Cokelet E D. The deformation of steep surface waves on water. I. A numerical method of computation[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1976, 350(1660): 1–26.
- [4] Ogilvie T F, Tuck E O. A rational strip theory of ship motions: Part I[R]. University of Michigan, 1969.
- [5] Faltinsen O M. A rational strip theory of ship motions: Part II[R]. University of Michigan, 1971.
- [6] Hess J L, Smith A M O. Calculation of potential flow about arbitrary bodies[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1967, 8: 1–138.
- [7] 贺五洲, 戴遗山. 简单Green函数法求解三维水动力系数[J]. *中国造船*, 1986, 2: 3–17.
He Wuzhou, Dai Yishan. Calculation of three-dimensional hydrodynamic coefficients by simple Green's function technique [J]. *Shipbuilding of China*, 1986, 2: 3–17. (in Chinese)
- [8] Price W G, Wu Y. Hydroelasticity of marine structures[M]. Elsevier, 1985: 311–337.
- [9] 田超, 吴有生. 船舶水弹性力学理论的研究进展[J]. *中国造船*, 2008, 49(4): 1–11.
Tian Chao, Wu Yousheng. Review of research on the hydroelasticity of ship[J]. *Shipbuilding of China*, 2008, 49(4): 1–11. (in Chinese)
- [10] Pinkster J A. Low frequency second order wave exciting forces on floating structures[M]. *Mechanical Maritime & Materials Engineering*, 1980.
- [11] 袁梦. 深海浮式结构物系泊系统的非线性时域分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Yuan Meng. Time domain nonlinear analysis of the mooring system of deep-water floating structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [12] Tavassoli A, Kim M H. Interactions of fully nonlinear waves with submerged bodies by a 2D viscous NWT[C]//11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001.
- [13] Sussman M, Smereka P, Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 114(1): 146–159.
- [14] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201–225.
- [15] Tezdogan T, Demirel Y K, Kellett P, et al. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 97: 186–206.
- [16] Oggiano L, Pierella F, Nygaard T A, et al. Reproduction of steep long crested irregular waves with CFD using the VOF method[J]. *Energy Procedia*, 2017, 137: 273–281.
- [17] Song S, Demirel Y K, Atlar M, et al. Validation of the CFD approach for modelling roughness effect on ship resistance[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200: 107029.
- [18] Ransley E, Yan S, Brown S, et al. A blind comparative study of focused wave interactions with a fixed FPSO-like structure (CCP-WSI blind test series 1)[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2019, 29: 113–127.
- [19] Ransley E, Yan S, Brown S, et al. A blind comparative study of focused wave interactions with floating structures (CCP-WSI blind test series 3)[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2020, 30: 1–10.
- [20] Robaux F, Benoit M. Assessment of one-way coupling methods from a potential to a viscous flow solver based on domain- and functional-decomposition for fixed submerged bodies in nonlinear waves[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2022, 95: 315–334.
- [21] Prandtl L. Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung[C]//*Proceedings of the Third International Mathematical Congress. Heidelberg: Leipzig: Teubner*, 1904: 484–491.
- [22] Narayanaswamy M S. A hybrid Boussinesq-SPH wave propagation model with applications to forced waves in rectangular tanks[D]. Johns Hopkins University, 2008.
- [23] Christensen E D, Bredmose H, Hansen E A. Transfer of Boussinesq waves to a Navier-Stokes solver: Application to wave loads on an offshore wind turbine foundation[C]//*Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu, Hawaii, USA: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 2009: 917–926.
- [24] Kassiotis C, Ferrand M, Violeau D, et al. Coupling SPH with a 1-D Boussinesq-type wave model[C]//6th International SPHERIC Workshop, Hamburg, Germany, 2011: 241–247.

- [25] Wei Y, Abadie T, Dias F. A cost-effective method for modelling wave-OWSC interaction[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2017, 27: 366-373.
- [26] Altomare C, Suzuki T, Domínguez J, et al. Coupling between swash and SPH for real coastal problems[C]//9th International Smoothed Particle Hydrodynamics Research and Engineering International Community Workshop, Paris, France, 2014.
- [27] Campana E F, Mascio A D, Esposito P G, et al. Domain decomposition in free surface viscous flows[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1994: 329-340.
- [28] Campana E F, Mascio A D, Esposito P G, et al. Viscous-inviscid coupling in free surface ship flows[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1995, 21(9): 699-722.
- [29] Guignard S, Grilli S T, Marcer R, et al. Computation of shoaling and breaking waves in nearshore areas by the coupling of BEM and VOF methods[C]//The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 1999: 304-309.
- [30] Iafrati A, Campana E F. A domain decomposition approach to compute wave breaking (wave-breaking flows)[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2003, 41(4): 419-445.
- [31] Lachaume C, Biaisser B, Fraunié P, et al. Modeling of breaking and post-breaking waves on slopes by coupling of BEM and VOF methods[C]//The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003: 353-359.
- [32] Biaisser B, Fraunié P, Grilli S T, et al. Numerical analysis of the internal kinematics and dynamics of 3-D breaking waves on slopes[C]//Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003.
- [33] Drevard D, Marcer R, Grilli S T, et al. Experimental validation of a coupled BEM-Navier-Stokes model for solitary wave shoaling and breaking[C]//Ocean Waves Measurement and Analysis, Fifth International Symposium WAVES 2005, Madrid, Spain, 2005: 166.
- [34] Colicchio G, Greco M, Faltinsen O M. A BEM-level set domain-decomposition strategy for non-linear and fragmented interfacial flows[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(10): 1385-1419.
- [35] Kim S, Yamashiro M, Yoshida A. A simple two-way coupling method of BEM and VOF model for random wave calculations [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(11): 1018-1028.
- [36] Zhang Y, Peszynska M, Yim S C. Coupling of viscous and potential flow models with free surface for near and far field wave propagation[J]. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, 2013, 4(3): 256-282.
- [37] Zhang Y, Yim S C. Solitary wave breaking on irregular 3D bathymetry using a coupled potential+viscous flow model[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015, 141(6): 04014171.
- [38] 孟巍, 孙丽萍, 李益, 等. 基于双向势流-黏流耦合的数值消波模拟[J]. *中国造船*, 2022, 63(3): 51-60.
Meng Wei, Sun Liping, Li Yi, et al. Numerical simulations of wave absorption based on two-way potential-viscous flow coupling method[J]. *Shipbuilding of China*, 2022, 63(3): 51-60. (in Chinese)
- [39] Oger G, Touzé D L, Ducrozet G, et al. A coupled SPH-spectral method for the simulation of wave train impacts on a FPSO [C]//Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V002T08A088.
- [40] Nelli F, Skene D M, Bennetts L G, et al. Experimental and numerical models of wave reflection and transmission by an ice floe[C]//ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim, Norway: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2017.
- [41] Zhuang Y, Wan D C, Bouscasse B, et al. Regular and irregular wave generation in openfoam using high order spectral method[C]//The 13th OpenFOAM Workshop (OFW13), Shanghai, China, 2018: 189-192.
- [42] Choi Y, Bouscasse B, Seng S, et al. Generation of regular and irregular waves in Navier-Stokes CFD solvers by matching with the nonlinear potential wave solution at the boundaries[C]//ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid, Spain: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
- [43] 韩勃, 万德成. 直立圆柱波浪爬升 HOS-CFD 数值模拟[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议文集, 2019: 659-670.
Han Bo, Wan Decheng. Numerical simulation of surface elevation around a circular column based on HOS-CFD[C]//Proceedings of the 30th National Conference on Hydrodynamics and 15th National Congress on Hydrodynamics, 2019: 659-670. (in Chinese)

- [44] 宋家琦. 基于高阶谱方法与CFD耦合模型的极端波浪数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
Song Jiaqi. The numerical simulation of extreme waves with coupling model based on high-order spectral method and CFD [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [45] 宋家琦, 万德成. 基于高阶谱方法与CFD计算的耦合模型在不规则波模拟中的应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(1): 1-12.
Song Jiaqi, Wan Decheng. Application of coupling model based on high-order spectral method and CFD calculation in simulating irregular waves[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2019, 34(1): 1-12. (in Chinese)
- [46] 庄 园, 万德成. 高阶谱方法与CFD方法耦合的数值模拟技术[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(上册), 2019: 63-75.
Zhuang Yuan, Wan Decheng. Numerical simulation based on a coupled method with high-order spectral method and CFD method[C]//Proceedings of the 30th National Conference on Hydrodynamics and 15th National Congress on Hydrodynamics, 2019: 63-75. (in Chinese)
- [47] 郭 浩. 基于粘性流和粘势流耦合方法的船舶波浪增阻与运动响应数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
Guo Hao. Numerical study on added resistance and motions based on viscous flow and coupled viscous potential method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
- [48] 韩 勃, 赵伟文, 万德成. 基于HOS-CFD黏势流耦合方法模拟直立圆柱波浪爬升[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2021, 36(2): 228-236.
Han Bo, Zhao Weiwen, Wan Decheng. Numerical simulation of wave elevation around fixed vertical cylinder based on HOS-CFD[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2021, 36(2): 228-236. (in Chinese)
- [49] Zhuang Y, Wan D C. Parametric study of a new HOS-CFD coupling method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33(1): 43-54.
- [50] Kristiansen T, Faltinsen O M. Gap resonance analyzed by a new domain-decomposition method combining potential and viscous flow draft[J]. Applied Ocean Research, 2012, 34: 198-208.
- [51] Lu X, Chandar D D, Chen Y, et al. An overlapping domain decomposition based near-far field coupling method for wave structure interaction simulations[J]. Coastal Engineering, 2017, 126: 37-50.
- [52] Glowinski R, Dinh Q V, Periaux J. Domain decomposition methods for nonlinear problems in fluid dynamics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1983, 40(1): 27-109.
- [53] Dinh Q V, Glowinski R, Périaux J, et al. On the coupling of viscous and inviscid models for incompressible fluid flows via domain decomposition[C]//First Conf. on Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations, SIAM Philadelphia, 1988: 350-368.
- [54] Kim J, O'Sullivan J, Read A. Ringing analysis of a vertical cylinder by Euler overlay method[C]//Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 855-866.
- [55] Baquet A, Kim J, Huang Z. Numerical modeling using CFD and potential wave theory for three-hour nonlinear irregular wave simulations[C]//Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim, Norway: American Society of Mechanical Engineers, 2017: V001T01A002.
- [56] Paulsen B T, Bredmose H, Bingham H B. An efficient domain decomposition strategy for wave loads on surface piercing circular cylinders[J]. Coastal Engineering, 2014, 86: 57-76.
- [57] 钟文杰, 陈 帆, 万德成. 基于势流-黏流双向耦合模型的数值造波[J]. 中国造船, 2022, 63(2): 30-40.
Zhong Wenjie, Chen Fan, Wan Decheng. Development of numerical wave model based on potential-viscous flow coupling method[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(2): 30-40. (in Chinese)
- [58] Li Q, Wang J, Yan S, et al. A zonal hybrid approach coupling FNPT with Openfoam for modelling wave-structure interactions with action of current[J]. Ocean Systems Engineering, 2018, 8(4): 381-407.
- [59] Li Q, Yan S, Wang J, et al. Numerical simulation of focusing wave interaction with FPSO-like structure using FNPT-NS solver[C]//The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018.

- [60] Yan S, Wang J, Wang J, et al. Numerical simulation of wave structure interaction using Qalefoam[C]//The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019.
- [61] Zhang N, Yan S, Zheng X, et al. A 3-D hybrid model coupling SPH and QALE-FEM for simulating nonlinear water wave interaction with floating structure[C]//The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019.
- [62] Zhang N, Yan S, Zheng X, et al. A 3D hybrid model coupling SPH and QALE-FEM for simulating nonlinear wave-structure interaction[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2020, 30: 11-19.
- [63] Zhang N, Yan S, Zheng X, et al. Numerical study of interaction of focused waves with a fixed cylinder by a hybrid model coupling SPH and QALE-FEM[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2021, 31: 45-52.
- [64] 赵彬彬, 陈永博, 段文洋. 基于势粘流单向耦合的KCS波浪增阻研究[C]//中国造船工程学会船舶力学学术委员会第九届全体会议, 中国无锡, 2018: 245-252.
Zhao Binbin, Chen Yongbo, Duan Wenyang. Study on added resistance of KCS based on one-way potential-viscous coupling method[C]//The 9th Plenary Session of the Academic Committee on Ship Mechanics of the China Shipbuilding Engineering Society, Wuxi, China, 2018: 245-252. (in Chinese)
- [65] 赵彬彬, 陈永博, 段文洋. 势粘流单向耦合的直立圆柱波浪爬升模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(7): 1208-1216.
Zhao Binbin, Chen Yongbo, Duan Wenyang. Wave run-up simulation on a vertical cylinder based on potential and viscous flow single-direction coupling technique[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(7): 1208-1216. (in Chinese)
- [66] W Junxian, Y Shiqiang, M Qingwei, et al. Modelling of focused wave interaction with wave energy converter models using Qalefoam[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 2020, 173(3): 100-118.
- [67] Hildebrandt A, Sriram V, Schlurmann T. Simulation of focusing waves and local line forces due to wave impacts on a tripod structure[C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013: 575-581.
- [68] Hamilton J A. Viscous-inviscid matching for wave-body interaction problems[D]. Ann Arbor: University of California, Berkeley, 2002.
- [69] Sriram V, Ma Q W, Schlurmann T. A hybrid method for modelling two dimensional non-breaking and breaking waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 272: 429-454.
- [70] Kumar G M, Sriram V, Didenkulova I. A hybrid numerical model based on FNPT-NS for the estimation of long wave run-up[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 202: 107181.
- [71] Colagrossi A, Antuono M, Touzé D L. Theoretical considerations on the free-surface role in the smoothed-particle-hydrodynamics model[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(5): 056701.
- [72] Zhuang Y, Wan D C, Bouscasse B, et al. A combined method of HOS and CFD for simulating a container ship in steep waves [C]//The 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Osaka, Japan, 2020.
- [73] Horel B, Bouscasse B, Merrien A, et al. Experimental assessment of vertical shear force and bending moment in severe sea conditions[C]//ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2019.
- [74] Agarwal S, Sriram V, Murali K. Three-dimensional coupling between Boussinesq (FEM) and Navier-Stokes (particle based) models for wave structure interaction[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 263: 112426.
- [75] Saincher S, Sriram V. A three dimensional hybrid fully nonlinear potential flow and Navier Stokes model for wave structure interactions[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112770.
- [76] 郭浩, 王乃函, 张祥瑞, 等. 基于黏势流耦合方法的KCS船运动响应与波浪增阻数值研究[J]. *中国造船*, 2023, 64(1): 47-60.
Guo Hao, Wang Naihan, Zhang Xiangrui, et al. Numerical study on motions and added resistance of KCS based on coupled viscous and potential method[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(1): 47-60. (in Chinese)

- [77] Kim K, Sirviente A I, Beck R F. The complementary RANS equations for the simulation of viscous flows[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005, 48(2): 199–229.
- [78] Hafez M, Shatalov A, Nakajima M. Improved numerical simulations of incompressible flows based on viscous/inviscid interaction procedures[J]. *Computers & Fluids*, 2007, 36(10): 1588–1591.
- [79] 赵 骥. 船舶水动力的粘势流耦合方法初探[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
Zhao Ji. Study on viscous/potential method for ship hydrodynamics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [80] 赵 骥, 朱仁传, 缪国平. 基于 Helmholtz 速度分解的黏势流耦合方法[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(1): 103–109.
Zhao Ji, Zhu Renchuan, Miao Guoping. Approach of viscous/potential flow based on Helmholtz velocity decomposition[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(1): 103–109. (in Chinese)
- [81] 赵 骥, 朱仁传, 缪国平. 求解 SUBOFF 绕流问题的粘势流耦合方法[J]. *中国造船*, 2017, 58(1): 73–82.
Zhao Ji, Zhu Renchuan, Miao Guoping. Approach of viscous/potential flow over SUBOFF[J]. *Shipbuilding of China*, 2017, 58(1): 73–82. (in Chinese)
- [82] Edmund D O. A velocity decomposition method for efficient numerical computation of steady external flows[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2012.
- [83] Rosemergy W J, Edmund D O, Maki K J, et al. A velocity decomposition approach for steady free-surface flow[C]//29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [84] Chen Y, Maki K J. A velocity decomposition approach for three-dimensional unsteady flow[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2017, 62: 94–108.
- [85] Zhang X. Multi-model method for simulating 2D surface-piercing wave-structure interactions[D]. London: University of London, 2018.
- [86] Edmund D O, Maki K J, Beck R F. An improved viscous/inviscid velocity decomposition method[C]//26th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Athens, Greece, 2011.
- [87] Edmund D O, Maki K J, Beck R F. A velocity-decomposition formulation for the incompressible Navier-Stokes equations [J]. *Computational Mechanics*, 2013, 52(3): 669–680.
- [88] Ferrant P, Gentaz L, Touzé D L. A new RANSE/potential approach for water wave diffraction[C]//Numerical Towing Tank Symposium, NUTTS'2002, Pornichet, France, 2002.
- [89] Ferrant P, Gentaz L, Alessandrini B, et al. A potential/RANSE approach for regular water wave diffraction about 2-D structures[J]. *Ship Technology Research*, 2003, 50(4): 165–171.
- [90] Luquet R, Ducrozet G, Gentaz L, et al. Application of the SWENSE method to seakeeping simulations in irregular waves[C]//9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan, 2007.
- [91] Luquet R, Ferrant P, Alessandrini B, et al. Simulation of a TLP in waves using the SWENSE scheme[C]//The Proceedings of the 17th (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007.
- [92] Alessandrini B, Ferrant P, Gentaz L, et al. Numerical simulation of ship seakeeping by the SWENSE approach[C]//Proceedings of the 10th International Ship Stability Workshop, Daejeon, Korea, 2008: 23–25.
- [93] Monroy C, Ducrozet G, Reilhac P, et al. RANS simulations of ship motions in regular and irregular head seas using the SW-ENSE method[C]//The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2009: 458–467.
- [94] Reliquet G, Drouet A, Guillerm P, et al. Simulation of wave-body interaction using a single-phase level set function in the SWENSE method[C]//ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2013.
- [95] Reliquet G, Robert M, Gentaz L, et al. Simulations of the Delft 372 catamaran in waves using SWENSE-level set coupling [J]. *La Houille Blanche*, 2019, 105(5–6): 59–66.
- [96] Vukčević V. Numerical modelling of coupled potential and viscous flow for marine applications[D]. Zagreb, Croatia: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2016.
- [97] Gatin I, Vukčević V, Jasak H. A framework for efficient irregular wave simulations using higher order spectral method coupled with viscous two phase model[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2017, 2(4): 253–267.

- [98] Li Z, Gentaz L, Ducrozet G, et al. Calculation of high-order wave loads on a vertical circular cylinder using the SWENSE method[C]//32th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Dalian, China, 2017.
- [99] Li Z, Bouscasse B, Gentaz L, et al. Progress in coupling potential wave models and two-phase solvers with the SWENSE methodology[C]//ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid, Spain: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
- [100] Li Z, Bouscasse B, Ducrozet G, et al. Spectral wave explicit Navier-Stokes equations for wave-structure interactions using two-phase computational fluid dynamics solvers[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 221: 108513.
- [101] Chen Y, Maki K J, Rosemurgy W J. A velocity decomposition approach for unsteady external flow[C]//ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015.
- [102] Gentaz L, Luquet R, Alessandrini B, et al. Numerical simulation of the 3D viscous flow around a vertical cylinder in non-linear waves using an explicit incident wave model[C]//ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008: 157-163.
- [103] Aliyar S. Extreme wave interaction with fixed and floating structures using hybrid coupling approach[D]. Chennai: Institute of Technology Madras, 2022.
- [104] Yu J, Yao C, Liu L, et al. Numerical study on wave-structure interaction based on functional decomposition method[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113067.