

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20220930.1030.001.html>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 于连杰, 赵伟文, 万德成. 含水气界面水动力噪声计算方法研究与应用进展综述 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 85-102.

YU L J, ZHAO W W, WAN D C. Research progress and application of computational method for hydrodynamic noise from air-water interface[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 85-102.

含水气界面水动力噪声计算方法 研究与应用进展综述



扫码阅读全文

于连杰^{1,2}, 赵伟文^{1,2}, 万德成^{*1,2}

1 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心, 上海 200240

2 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

摘要: 含水气界面水动力噪声是船海工程结构物经常遇到的一类典型重要噪声, 具有机理复杂、声源形式多样、传播影响因素众多等特点。含水气界面水动力噪声与自由面相互作用, 受空化、水气泡混合流等影响, 对舰船的隐蔽性造成很多负面影响, 具有重要的研究意义。分别从自由面噪声、空化噪声和水气泡混合流噪声3个方面进行介绍, 并阐述相应噪声的计算方法以及在噪声计算时需要考虑的关键问题和目前所采用的解决方案。最后, 展望未来的研究发展方向。

关键词: 水动力噪声; 自由面流动; 空化; 水气泡混合流

中图分类号: U661.44

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02862

Research progress and application of computational method for hydrodynamic noise from air-water interface

YU Lianjie^{1,2}, ZHAO Weiwen^{1,2}, WAN Decheng^{*1,2}

1 Computational Marine Hydrodynamics Laboratory, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Hydrodynamic noise from an air-water interface is often encountered in marine engineering structures. It involves a complex mechanism, various forms of sound sources and many factors affecting the propagation. It interacts with the free surface and is affected by cavitation and water-air-bubble mixed flow, which has a negative impact on the concealment of the ship, giving this line of inquiry strong research significance. This paper introduces a noise calculation method and its applications in terms of free surface noise, cavitation noise and water-air-bubble mixed flow noise respectively, and describes their computational methods and key issues. The solutions currently in use are also introduced. Finally, future research directions are proposed.

Key words: hydrodynamic noise; free surface flow; cavitation; water-air-bubble mixed flow

0 引言

近年来, 海洋噪声污染引起了广泛关注^[1], 不仅会对船舶舒适性产生影响, 还会影响海洋生物, 国际海事组织(IMO)为此专门制定了商用船

舶噪声标准^[2]。此外, 水下噪声对水下航行器(如潜艇)的隐蔽性也有重要影响, 航行器航行产生的各类噪声很容易与各向同性的海洋环境噪声区分开来, 使得其更容易被敌方声呐发现, 暴露位置。因此, 掌握水下噪声的形成机理和预报方

收稿日期: 2022-04-18

修回日期: 2022-06-05

网络首发时间: 2022-10-08 11:55

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52131102, 51879159, 51909160); 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1704200)

作者简介: 于连杰, 男, 1993年生, 博士生。研究方向: 船舶与海洋工程流动噪声。E-mail: leo_yates@163.com

赵伟文, 男, 1990年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 船海计算流体力学。E-mail: weiwen.zhao@sjtu.edu.cn

万德成, 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶与海洋工程计算流体力学。

E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

*通信作者: 万德成

法,有助于优化潜艇结构设计,同时,也为声呐准确捕获敌方舰艇提供指导。

海洋结构物水下噪声可以分为3种:船体振动噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声^[3]。流体流经结构物,会产生泄涡、湍流脉动等现象,引发水动力噪声。如果不考虑流动诱发的振动,水动力噪声也叫作流动噪声^[4]。振动噪声的机理已较为明确,可通过声振理论等较准确预报^[5]。螺旋桨噪声本质上可以归为振动噪声和水动力噪声2个部分。水动力噪声由于实验测试难度较大,数值模拟存在计算量巨大、传播模型不明确等困难,因此一直是当前水下噪声预报的热点和难点^[6]。在工程领域,水动力噪声不仅影响军用舰艇和水下潜航器的隐蔽性,还会影响船舶舒适性^[7]。

当前对单相流动噪声的应用研究,比较典型的是湍流边界层噪声和空腔振荡噪声。对于含界面水动力噪声的研究比较少。含水气界面流动是船舶与海洋工程经常遇到的流动状态,是重要的噪声来源^[8]。尤其是自由面噪声、空化噪声和水气泡混合流噪声。这3类噪声是在实际海洋环境中经常会遇到,同时相比于单相流噪声,又具有声源构造和传播模型复杂等难题。因此,含水气界面水动力噪声吸引了国内外学者的关注^[9]。含水气界面流动通常包括3种:气-液两相流动、固-液两相流动(如颗粒流)^[10]、多层流动(如潜艇分层流)^[11]。本文研究的含水气界面流动主要是指气-液两相流动。

尽管当前国内外开展了一些含水气界面水动力噪声的模型试验,但是由于噪声问题的尺度效应还不明确,由模型尺度向实尺度换算缺乏理论依据。国外虽然已经开展了一些实尺度水面船舶水动力噪声的实验研究^[12],但是耗时长、代价高。相较而言,数值模拟能够进行实尺度预报,从流场和声场能够提取各类所需数据,可重复性较高,适合机理性研究。因此,对含水气界面水动力噪声的数值模拟是未来研究发展的趋势。

俄罗斯、英国、法国、德国等国已经开发了一些比较成熟的水动力学噪声预报软件。国内大多使用商业软件,使用者无法对软件内部代码进行适应性调整,这制约了水动力噪声的研究发展^[13]。

水气界面的存在会对水动力噪声产生重要的影响,具体可以归纳为以下3个方面:

1) 气泡的初生、变形、聚并等行为会对流场脉动造成影响,产生新的声源^[14]。螺旋桨空化会形成大量空泡,空泡的产生会形成较高水平的噪声源。当液滴撞击自由面时,会在水下生成微小气泡,微小气泡变形、聚并会产生振荡,进而辐射

噪声。

2) 气泡的存在还会对噪声的传播产生影响,主要体现在声速变化和声功率损失2个方面。流体中散布的气泡不仅会对声波波速产生影响,还会对声功率造成损失。当噪声在流体中穿过气泡时,会引起气泡的微幅振动,这种振动会影响声速并造成能量耗散。

3) 除了水下气泡会对噪声产生影响外,自由面的存在对声波有反射作用,并对声阻尼产生影响。

水动力噪声预报由于计算量巨大,除了一些简单的几何和二维算例^[15-16],一般不采用直接数值模拟(DNS)方法,比较具有代表性的是 Lighthill 声类比方法和 Powell 涡声理论。声类比方法允许将流体和声学问题解耦。其基本思想是将流体看成声源的集合,并在远场使用波动方程描述压力脉动传播和相互作用的过程^[17]。这种方法最早由 Lighthill^[18]提出,因此被称为 Lighthill 声类比方法。在此基础上,又陆续出现了 Kirchhoff 积分方法^[19-20]、线性欧拉方程^[21]以及 Powell 涡声理论^[22-23]。但是这些方法在应用到含水气界面水动力噪声时,还需要考虑气泡声源、声反射、衰减等特殊问题。

目前,国内外学者对含水气界面水动力噪声的研究主要集中在以下3个领域:

1) 带自由面的流动噪声研究。准确的界面捕捉是预报自由面噪声的基础,当前的界面捕捉方法主要有流体体积方法(VOF)、水平集方法(Level Set)以及流体体积-水平集耦合方法(Level Set-VOF 耦合方法,CLS-VOF)。噪声传播方面,自由面的存在将会带来很多特殊性,例如声波的反射。本文将在第1章介绍当前常用的几种界面捕捉方法以及自由面噪声的反射和应用。

2) 空化噪声研究。空化一旦形成,将会成为主要声源。当前对空泡噪声源的考虑是简化的,一般采用球形波假设。学者们通过水翼和螺旋桨的数值模拟,研究空化噪声的特性。本文将在第2章介绍空泡噪声源的考虑方法以及空化噪声特性及其抑制手段。

3) 水气泡混合流噪声研究。在实际海洋环境中,船海结构物和周围流体相互作用,会出现明显的白色泡沫流动,即为水气泡混合流。其涉及到多尺度的气泡^[24],以及液面卷吸等复杂现象。对于该种水动力噪声的预报,还未形成统一的方法,当前国外主要是通过实验结果反演拟合获得噪声谱,进而预报噪声^[25]。国内缺乏对这类噪声的深入研究。本文将在第3章介绍水气泡混

合流中气泡群和液滴等对噪声的影响以及国外研究现状。

1 自由面噪声计算方法应用

对于存在自由面的水动力噪声研究起步较晚,其形成机理、预报方法和控制手段相对而言不成熟。而实际海洋结构物所处的工况,一般存在自由面。自由面的精确捕捉,不仅涉及到实海况的还原,而且对于自由面噪声的预报至关重要。噪声在传播过程中,会发生反射、折射、衍射、扩散和衰减。一般认为,对于自由面这类大密度跨越的情况,声波的折射几乎不用考虑^[26]。衍射、扩散和衰减对于微幅波或者静水条件也不必考虑。因此,自由面的作用主要是反射。

1.1 自由面噪声计算思路

自由面噪声作为水下噪声的一种,具有水下噪声的共性问题,也有其特殊性。水下噪声模拟采用 DNS 方法是不切实际的。主要原因有 2 个:流场的不可压缩性和声场的可压缩性之间存在矛盾;计算域大小和网格数限制了声场预报的范围,从而无法预报远场噪声^[27]。因此,当前主要采用流声比拟方法进行自由面噪声预报。

流声比拟的基本思想是将流场划分为近场和远场,近场采用雷诺平均(RANS)、分离涡(DES)和大涡模拟(LES)等方法计算,并将流场结果作为输入数据,进行远场的声学预报。流声比拟法的优点可以归结为:1) 从有限的流体域求解出

发,可以积分获得远场中任何一点的声压;2) 由于存在多种声源,因此能够通过声源形式判定流场中噪声的形成机制;3) 由于水下问题一般认为是不可压缩的,因此可以采用不可压缩 N-S 方程求解流场(近场),构造声源。

对于自由面噪声而言,流场的计算还存在一个特殊问题,即界面捕捉。界面的准确捕捉不仅影响到流场的压力计算,还会对反射效应产生影响。1.2 节将对界面捕捉问题进行详细介绍。

流场计算完成后进入声学部分。常用的流声比拟方程有 Lighthill 方程、Powell 涡声方程等,它们将流场中的速度、压力、几何等信息重组,构造成声源,包括 Lighthill 四极子声源、Curle 偶极子声源等。在工程领域,一般采用可穿透福茨-威廉姆-霍金斯(Ffowcs Williams-Hawkings, FW-H)积分面来计算声源,这种方法计算效率高、准确性较好。直接按照自由空间传播规律预报声源的远场噪声,这就是最基本的湍流噪声计算方式,将在 1.3 节中详细介绍。但是,对于自由面噪声,还需要考虑其特殊的传播问题。

一般来说,自由面对声传播的影响主要是两方面:反射和衰减。其中,衰减规律主要是通过实验获得的不同频率成分的衰减因子来近似估计的,在工程中一般不作考虑。反射的影响可以通过镜像法、半自由空间格林函数等方式予以考虑,在 1.4 节中会进行详细介绍。

图 1 所示为自由面噪声的计算思路及其方法流程。

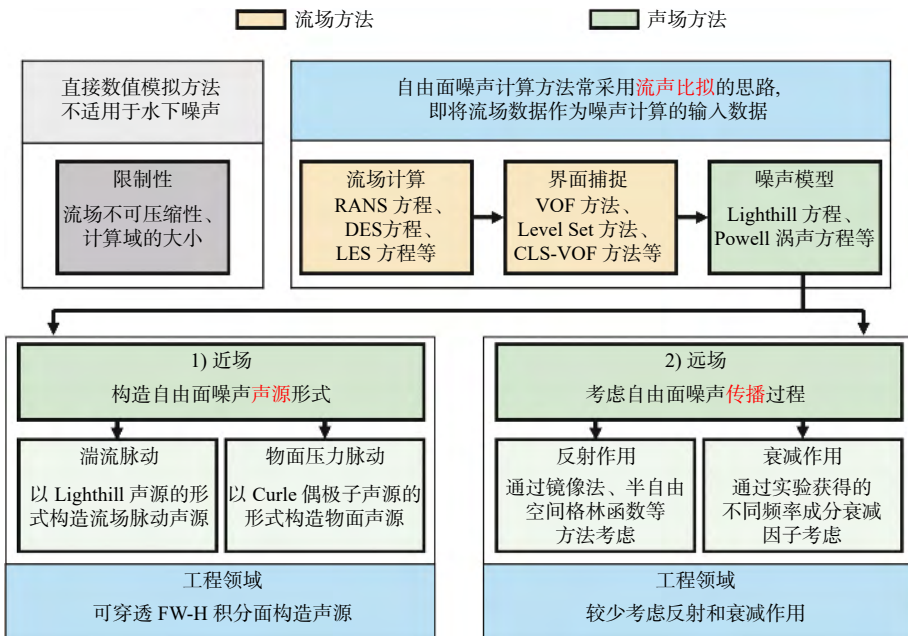


图 1 自由面噪声计算方法思路 and 流程

Fig. 1 Computational method and workflow for noise with free surface

1.2 自由面捕捉方法

自由面的位置对水下压力场的计算会产生影响,进而影响到流动噪声预报。因此,有必要研究界面捕捉的数值方法。目前,自由面捕捉算法可以分为VOF方法、Level Set方法以及近些年出现的CLS-VOF方法。

VOF方法的基本思想是在每个网格单元上定义一个体积分数 f ,该分数由水或气在网格中所占比例确定^[28]。

在上一时刻重构界面,下一时刻用代数方法求解体积分数 f 。根据代数方法的不同,又出现了紧致插值方法(CIP)等。CIP方法是通过在单个网格内给定约束条件,然后使用各类插值函数来完成整个界面的捕捉。CIP方法已被成功应用于非线性波^[29]、砰击问题^[30]等场景,能够较好地捕捉自由面。早期的VOF方法不需要几何重构,被称为SLIC类VOF方法。近些年出现了VOF方法的改进(需要几何重构),如分段线性几何重构(PLIC)VOF^[31]、双曲正切(THINC)方法^[32]等,PLIC方法的基本思想是将单个网格通过线性插值的平面分割成2个部分,保证求解体积分数输运方程时的准确性。THINC方法利用双曲正切函数来计算体积分数通量,它能较好地捕捉极度复杂扭曲的界面。

Level Set方法是将水气界面看作是某连续函数 ϕ 的零等值面,通过求解该函数,即可确定每个时刻的界面位置。Level Set方法相比于VOF方法的优势在于, ϕ 自带几何属性,不需要重构界面,因此捕捉的自由面更光滑^[33]。

近些年,出现了VOF和Level Set方法的结合——CLS-VOF方法^[34]。界面利用Level Set函数的零等值面表示,但是该函数要利用VOF函数进行校正来实现质量守恒,具体流程如图2所示。这种方法解决了Level Set容易出现的质量不守恒问题,是较为理想的自由面捕捉方法。

1.3 自由面湍流噪声计算方法

声波的产生离不开密度的变化,如果密度不发生变化,也就不存在噪声。这看起来与水下不可压缩条件相左,但如果将波动方程改写为有源的形式,将N-S方程的结果构造声源,再利用格林函数将该声源按照可压缩的线性波动方程解积分到远场,就能够解决这一矛盾^[35]。这就是Lighthill声类比思想。

声类比方法将流场划分成2个部分,一个是局部的湍流空间(近场),一个是湍流外的声场区

域(远场)。对于不可压缩流而言,声波在近场相较于湍流脉动幅值很小(约占1%),因此在近场通常不考虑声音对流动的影响。而在远场,由于假定是均匀介质,声辐射问题可以根据格林函数来求解。这样,只需要精确进行流体力学(CFD)模拟,再以此为声源,利用格林函数积分来计算远场噪声,如图3所示。

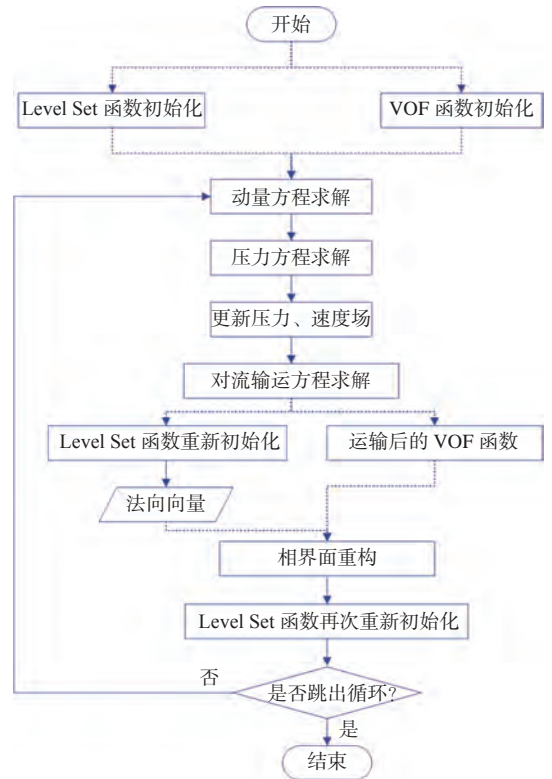


图2 CLS-VOF方法计算步骤

Fig. 2 Computation procedure of CLS-VOF method

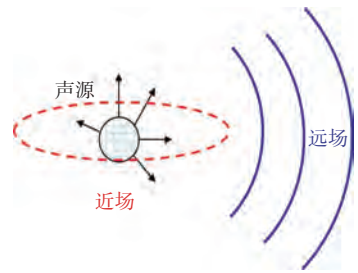


图3 Lighthill声类比中近场和远场示意图

Fig. 3 Schematics of the near-and far-field in the Lighthill acoustic analogy

Lighthill将N-S方程改写为波动方程的形式,将等号左边改写为波动算子的形式,其他项移到等号右边,作为源项。这就是著名的Lighthill声类比方程^[18]:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_\infty^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

式中: c_∞ 为无穷远处声速; ρ' 为密度脉动; x_i 和 x_j 为位置矢量的2个分量; t 为接收时间; T_{ij} 为Lighthill

应力张量。

T_{ij} 的公式为

$$T_{ij} = \rho v_i v_j - [(p - p_\infty) - (\rho - \rho_\infty) c_\infty^2] \delta_{ij} - \sigma_{ij} \quad (2)$$

式中: v_i 和 v_j 为局部速度矢量的2个分量; p_∞ 和 ρ_∞ 为无穷远处的压力和密度; δ_{ij} 为狄利克雷函数; σ_{ij} 为黏性应力张量; p 和 ρ 分别为流场当地的压力和密度。

在实际计算中,通常假设 $(p - p_\infty) = (\rho - \rho_\infty) c_\infty^2$,这样以密度为变量的波动方程可以很容易地扩展成压力为变量,更有利于声压计算^[36]。水下噪声问题中,通常将黏性张量 σ_{ij} 视为0。

Lighthill方程的意义重大,它改变了对噪声的传统认知,让人们了解即使没有物体运动,仍然会产生噪声,并由此开辟了流动噪声研究的先河。Lighthill声类比方法被广泛应用于航空和水动力学噪声领域,不仅是因为它的计算量较小,更是因为它在推导过程中没有对流场进行任何假设(Lighthill张量忽略黏性是为了方便计算),因而至今仍保持着生命力。

在应用到自由面附近时,只需要将流场(近场)数据替换成带有自由面的流场数据即可。这也是1.5节中计算船海结构物自由面噪声最常用的方法。但更准确的方式,应当是考虑自由面反射效应。这就是1.4节中介绍的镜像法应用在声类比方程中。

1.4 噪声反射效应的考虑方式

自由面对声场的影响复杂,当前主要是通过镜像法^[37],简单考虑自由面反射效应。尽管存在Lloyd衰减的经验公式^[38](高频衰减大,低频衰减小),但这种影响一般被忽略。这种方法适用于微幅波。对于波幅较大的情况,镜像法需要对每一个单元进行镜像计算,计算量过于庞大,且存在强耦合问题,该类研究比较少见。

与无限域传播模型(自由空间格林函数)不同的是,镜像法在计算测试点声压时,考虑了声源的2种信号:声源的直接信号和自由面反射信号。反射的信号是根据镜像辐射计算的,镜像源与真实源相对于自由面(平面)对称放置,因而和真实源的符号相反,两者存在时间延迟。原理如图4所示,图中 D 为圆柱直径,红点和黑色圆点均为水听器位置。

Cianferra等^[39]将镜像法应用到FW-H方程中,发现自由面可以产生依赖于频率的相长或相消干涉。忽略自由面反射效应时,近场测压点误差较小,但对于远场测压点,由于非线性的影响,

误差较大。Guo等^[40]采用镜像法研究远场声压,发现远场声指向性的波瓣数随着浸没深度的增加而增多。Li等^[41]利用镜像法,研究不同浸没深度下自由面反射对圆柱近场声场的影响。发现当浸没深度较大时,声压分布与无自由面时相似。当靠近自由面时,差异较大。但是未考虑圆柱靠近自由面对流场的影响。

事实上,当前应用镜像法的研究都未考虑自由面对流场的影响。而实际上,自由面的存在会显著影响流场细节^[31]。

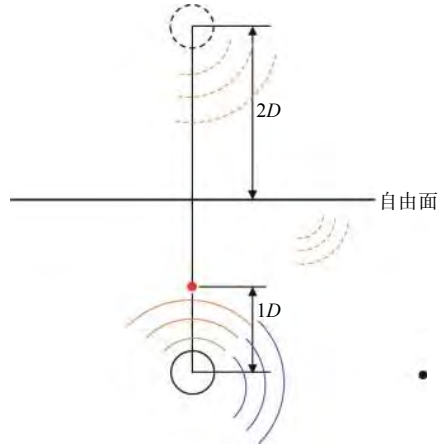


图4 镜像法示意图

Fig. 4 Schematics of method of images

1.5 船海结构物自由面噪声

当前对自由面噪声的数值预报,可以分为2种,一种是考虑自由面对流场的影响,但是不考虑声场的反射效应;另一种是不考虑自由面对流场的影响,仅考虑对声场的反射。前者主要应用在船体自由面附近的水动力噪声,因为船体存在兴波等复杂现象,对噪声传播的影响十分复杂,因此不予考虑。后者主要是螺旋桨等水下结构物噪声,因为螺旋桨对水面的影响较小,可以近似认为是镜面反射,对声场的考虑较为容易。

船体自由面噪声方面,Kellett等^[42]采用VOF方法对某商用船舶进行了带自由面的噪声数值预报,采用了可穿透积分面的声类比方法,如图5所示。由于没有考虑噪声的反射影响,预报结果比实验小20~25 dB。Ianniello等^[43]也只考虑自由面对流场的影响,发现声场预报结果与流场直接预报的压力存在偏差,并认为未考虑自由面反射是一个重要原因。Gaul等^[44]采用半无限域方法预报自由面噪声,即认为自由面将声能完全吸收。数值模拟研究还发现,水面舰船的水动力噪声与航速的5~7次方成正比。在航速大于10~12 kn时,水动力噪声不容忽视^[45]。

自由面对螺旋桨噪声预报的影响研究,主要

是通过镜像法来考虑反射效应。Cianferra等^[39]和Bosschers^[46]都将镜像法应用到声类比方程中,研究无空化螺旋桨水动力噪声。由于单极子(螺旋桨旋转产生的重要声源)的镜像相位滞后的影响,自由面使得低频声压被放大。在远场指向性分布上,研究发现,当螺旋桨距离自由面较近时,非线性声源(四极子)变为偶极子类型;而当距离自由面较远时,其恢复为四极子类型。

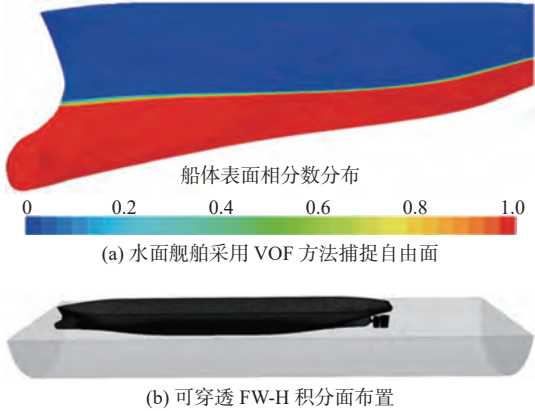


图5 考虑自由面的可穿透FW-H积分面^[43]

Fig. 5 Porous surface for FW-H formulation considering the free surface^[43]

流场的准确模拟是噪声精确预报的前提。LES方法较RANS模拟流场更加精确,近些年大部分自由面噪声采用LES方法计算流场。张维俊等^[47]采用LES模拟流场针对船体噪声辐射规律进行研究,发现球艙区和船艙区对流噪声辐射量贡献明显。王诗洋等^[48]采用LES求解流场,发现船舶的水动力噪声衰减速度随频率增大而减小。

在试验方面,Kozaczka等^[49]和Gloza^[50]进行了314次试验,实测波兰海军舰艇的水下噪声,通过测量声强得到浅水中近场噪声分布特性,发现水动力噪声主要影响100 Hz以上的频段^[51]。试验发现,水面船舶由于存在破波,其水动力噪声受到弗劳德数、雷诺数、湍流强度等的影响^[52-53]。McKenna等^[54]对美国加利福尼亚州近海的500艘集装箱船进行了统计,发现不同航速下,噪声差别达到5~10 dB。

2 空化噪声计算方法应用

当速度达到一定值时,结构物附近的局部压力就会低于临界压力值(伯努利方程),这时水就会汽化,产生空化现象。空化现象是水动力学特有的现象,对船海结构物造成负面影响,对噪声的影响尤为明显^[55]。实验发现,一旦出现空化,空泡将成为主要噪声源^[56]。因此,有必要对空化噪声进行研究。

空泡的一个重要特性是可冷凝,这就造成了空泡体积会随时间强烈脉动。这种脉动会形成一种高效的单极子噪声源,一般采用球形波传播模型求解这类声源。近些年,出现了一些抑制空化噪声的手段,如改善翼型、添加喷气孔、喷水孔等。

2.1 空化噪声计算思路

空化噪声的计算思路依然采用流声比拟的思想,总体上分成流场和声场2个部分。计算思路如图6所示。

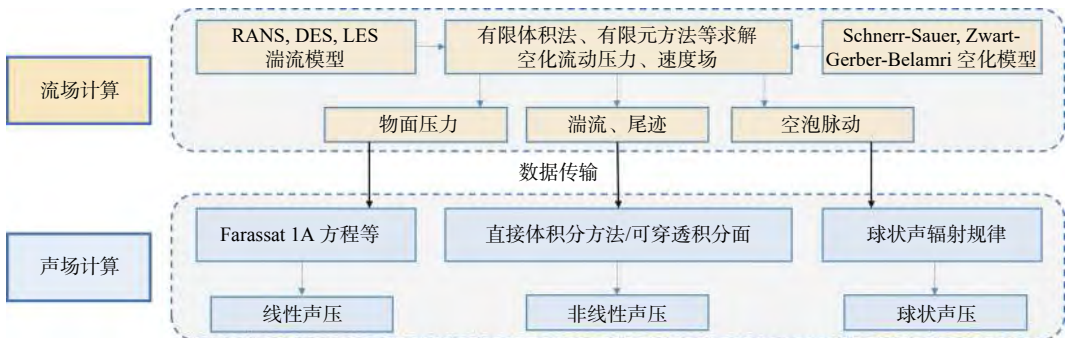


图6 空化噪声计算方法思路和流程

Fig. 6 Computational method and workflow for cavitation noise

流场部分相比于自由面噪声,需要考虑空化引发的相变问题。这里常用的解决方法是引入空化模型,也称质量转换模型。其推导过程是基于气泡动力学中最常用的Rayleigh-Plesset方程,通过在该方程右边添加源项来表示冷凝和汽化的过程:

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}^+ - \dot{m}^- \quad (3)$$

式中: ρ_v 为气态密度; u_j 为局部速度分量; α_v 为气

态体积分数; 源项 \dot{m}^+ 和 \dot{m}^- 分别代表汽化和凝结过程。源项不同的表达形式,对应不同的空化模型。例如 Schnerr-Sauer 空化模型:

$$\begin{aligned} \dot{m}^+ &= \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2 \max(p_v - p, 0)}{3 \rho_l}} \\ \dot{m}^- &= \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2 \max(p - p_v, 0)}{3 \rho_l}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ_l 为液态密度; p_v 为气态压力; R_b 为空泡长度。

此外, 还有 Merkle 空化模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型等。

通过湍流模型、空化模型获得流场数据, 包括物面压力、湍流尾迹、空泡脉动等信息, 数据传输作为声场的预报基础。

声场计算分成3种成分: 线性声压、非线性声压、球状声压。其中线性声压采用 Farassat 1A 方程等物面积分形式计算, 具体在2.2节中详细介绍; 非线性声压采用直接体积分方法或者可穿透积分面解决; 球状声压采用球状声辐射规律计算, 具体在2.3节中介绍。

2.2 运动物面噪声计算方法

Lighthill 方程可以解决无固壁的湍流噪声问题。但在工程领域, 更多的是由于结构物运动产生的噪声。空化噪声最常见的来源是螺旋桨空化, 因此需要能考虑物面旋转的噪声计算方法, 这就是 Kirchhoff 积分方法。

Kirchhoff 积分方法是基于 Lighthill 声类比以及惠更斯原理推导出的积分解。英国科学家 Curle^[19] 首先考虑了固定表面对流动噪声的影响, 利用 Kirchhoff 积分公式, 推导了有固定表面存在的流动噪声辐射的完整积分解, 也被称为 Curle 积分解:

$$p'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_\infty^2} \iiint_V \frac{1}{|d|} \cdot \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} dV + \frac{1}{4\pi c_\infty} \iint_S \frac{d}{|d|^2} \cdot \frac{dp}{dt} dS \quad (5)$$

式中: $|d|$ 为声源到测试点的距离; S 为面积分范围; V 为体积分范围; p' 为压力脉动。

Curle 积分解表明, 如果流场中的固体壁面是刚性物体, 并且声波波长远远大于固壁表面尺寸(看做紧致声源), 则固壁产生的噪声与一个偶极子点声源所产生的噪声一致^[57-59]。

Williams 等^[20] 将 Lighthill 声类比理论和 Curle 的理论推广到任意运动边界的流动发声问题, 得到了著名的 FW-H 方程(通常忽略四极子声源):

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c_\infty^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_n \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [p n_i \delta(f)] + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [H(f) T_{ij}] \quad (6)$$

式中: ρ_0 为静止处的密度; v_n 为法向局部速度; n_i 为局部法向量; $f=0$, 为可穿透积分面的解析函数式; $H(f)$ 为赫维赛德函数。

美国国家航空航天局(NASA)对 FW-H 方程的不同积分解进行了汇总, 并对这些解进行系统地命名, 例如 Farassat Formulations 1, Farassat Formulations 1A, Farassat Formulations 3 等^[60]。其中 Farassat Formulations 3 适用于超声速流动噪声, Farassat Formulations 1, Farassat Formulations 1A 适用于亚声速, 也就是绝大多数水动力噪声的预报。由于 Farassat Formulations 1 中存在观测点处的时间导数项, 增加了计算机执行时间并降低了结果的准确性, 而 Farassat Formulations 1A 方程将该导数用解析式的形式进行了改写。因此, 对 FW-H 方程的应用目前多采用 Farassat Formulations 1A 这种形式^[27,61-62]。

需要指出的是, 声类比理论是通过添加不同的源项, 来体现各类水下噪声形式。例如, 湍流脉动产生的声源是四极子声源(Lighthill 方程), 如果再考虑固体壁面的存在, 则应加上偶极子声源(Curle 积分解), 而如果再考虑壁面的各种运动, 如螺旋桨旋转等, 则应加上单极子声源(FW-H 积分解)。

Kirchhoff 积分方法也有一些固有缺陷, 例如: 1) 将远场假设为线性传播, 这与近场的声源非线性相矛盾, 并且近场与远场的分界线还没有定论^[63]; 2) 由于非线性声源既与黏性相关, 又与速度梯度相关, 因此预报得到的峰值频率会与流场对流速度频率不一致, 预报的结果中存在“伪声”成分; 3) 采用可穿透积分面积分时, 预报结果对积分面的选取十分敏感; 4) 无法解释水中涡引起的噪声, 不适合机理性研究。

2.3 空泡噪声源的考虑方式

根据 Brennen^[64] 的研究, 在远场中, 流动声源将接近单极子, 声压将由一阶项主导, 因为它随半径的衰减比二阶项慢。因此, 许多学者将空泡噪声源构造为一阶单极子声源^[65-66], 按照球形波传递规律辐射到远场。具体写作:

$$p'(r, t) = \frac{\rho \dot{V}_c(t)}{4\pi r} \quad (7)$$

式中: $\dot{V}_c(t)$ 为空泡体积的二阶时间导数; r 为声源到测试点的距离矢量。

上述方法对于 VOF 界面捕捉方法非常适用, 这是因为空泡体积很容易根据网格的体积 α 值来确定^[65]。

尽管对于非球状空泡的辐射噪声有过一些理论性研究^[67-68], 但尚未形成完善的解决方案。因此, 主要方法仍是采用数值计算的方式将空泡看

作球状声源进行计算。

Dubbioso 等^[66]采用球状单极子声源计算空泡声源,并将其应用于船舶操纵运动中的螺旋桨空化噪声预报中。Kim 等^[65]采用球状单极子声源模型计算水翼空化噪声。更多的文献没有考虑空泡对噪声源的单独影响,认为空泡只影响流场结果,仍然采用可穿透积分面(FW-H方法)^[69-71]。值得一提的是,球空泡噪声源需要用到体积分,因而需要较大的计算量。因此,通常忽略时间延迟效应,即采用紧致声源假设。

除了这种体积分球状声源外,3.1节中介绍的FW-H方程也可以考虑空泡声源^[72],即方程中的单极子声源(载荷噪声)。图7给出了单极子、偶极子和四极子的分布规律。但是,这种方式由于是采用面积分,因此只能考虑物体表面的相变,相对而言不够精确。

此外,近些年出现了采用机器学习的方法预报螺旋桨空化噪声,通过有限的实验数据和数值预报结果,外推到任意工况下获得噪声谱^[73-75]。这种方法有望成为空化噪声研究的一个未来趋势。

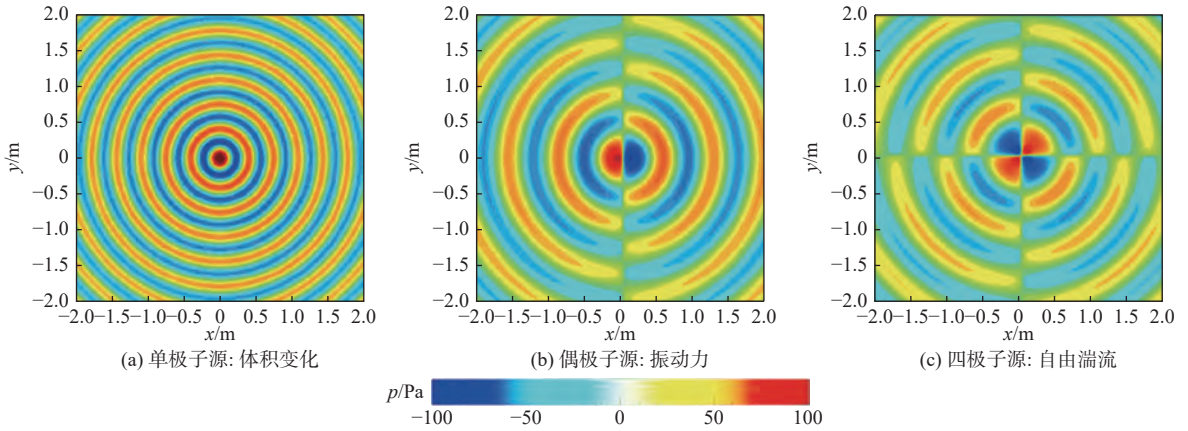


图7 3种声源的压力分布规律

Fig. 7 Pressure distribution of three sound sources

2.4 水翼空化噪声应用

空化噪声的研究可以分为水翼空化噪声和螺旋桨空化噪声2个方面。水翼可以看作是螺旋桨的简化模型,通常用来研究空化机理性问题^[76]。

对于不超过弦长一半的空化,通常认为是稳定的(定常空化),但这种空化在空泡闭合区域存在极不稳定的压力波动^[77],形成剧烈的噪声,其频率取决于空泡长度;对于不稳定空化(非定常空化),回射流和大空泡坍塌是噪声的主要来源^[78]。对于定常空化,声压的峰值受空泡伸缩周期的影响。随着空化数的增加,空化周期变短,声压幅值增加^[79]。水翼定常空化噪声实验表明,噪声峰值频率与空泡的伸缩频率一致。这再次验证了空化主导噪声的结论^[80]。对于水翼非定常空化,空化过程中声压存在2个峰值,一阶峰值由空泡脱落导致,二阶峰值由大空泡坍塌成小空泡所致^[81]。

空化模拟是空化噪声预报的基础。Kim 等^[65]对比了不同湍流模型预测的空化噪声,发现忽略黏性底层会导致空化噪声预报失真。除了常见的RANS和LES方法外,二者结合的DES方法在空化噪声流动模拟方面也获得了大量应用^[81-82]。NASA甚至认为RANS/LES算法是未来可在工业界大规模使用的准确方法之一^[83]。

噪声分布特性方面的研究发现,空化噪声从水翼前缘到后缘逐渐增大,当传输到水翼后缘下游时,声信号逐渐减小直至消失^[84]。随着频率的增加,噪声的偶极子特性逐渐消失,说明偶极子只在低频范围产生影响^[85]。

2.5 螺旋桨空化噪声应用

螺旋桨空化噪声的研究可以分成2类:敞水螺旋桨空化噪声和伴流螺旋桨空化噪声^[86]。

敞水空化方面,研究发现,空化会增加各个频率段内的噪声等级。经证明,梢涡空化会导致近场测试点总声压级上升约7 dB^[87]。当叶梢空化、片状空化、桨毂空化、叶根空化都出现时,声压级提高约10 dB,与船舶其他噪声源(如机械噪声)相比,这是一个不容忽视的数值^[88]。除此之外,随着螺旋桨叶片数增加,空化噪声逐渐降低^[89]。Ebrahimi 等^[90]对B型五叶桨研究发现,其空化噪声水平显著低于四叶桨。

伴流螺旋桨空化方面的研究发现,航速越高,空化噪声越大。Jeong 等^[91]发现航速每增加1 kn,螺旋桨空化噪声增加8~10 dB。此外,船舶操纵运动也对螺旋桨空化噪声产生影响,在船舶回转过程中,总声压级分布的不对称性增加,噪声指

向性向旋转中心倾斜, 如图 8 所示^[66], 图中 α 为空化的体积分数(无量纲), P 为总声压级。在实验方面, 模型尺度下的螺旋桨空化噪声是在空泡水筒这类器材中测量的。研究发现, 由缩尺实验放缩到实尺度空化噪声时, 低频部分的误差较大^[92]。

空化噪声的尺度换算目前还没有一个确定标准。正因为如此, 许多研究人员直接在实船上测量螺旋桨空化噪声^[93-94]。在大量实验数据基础上, 有的学者总结出一些半经验公式, 用于螺旋桨空化噪声的快速预报^[95-96]。

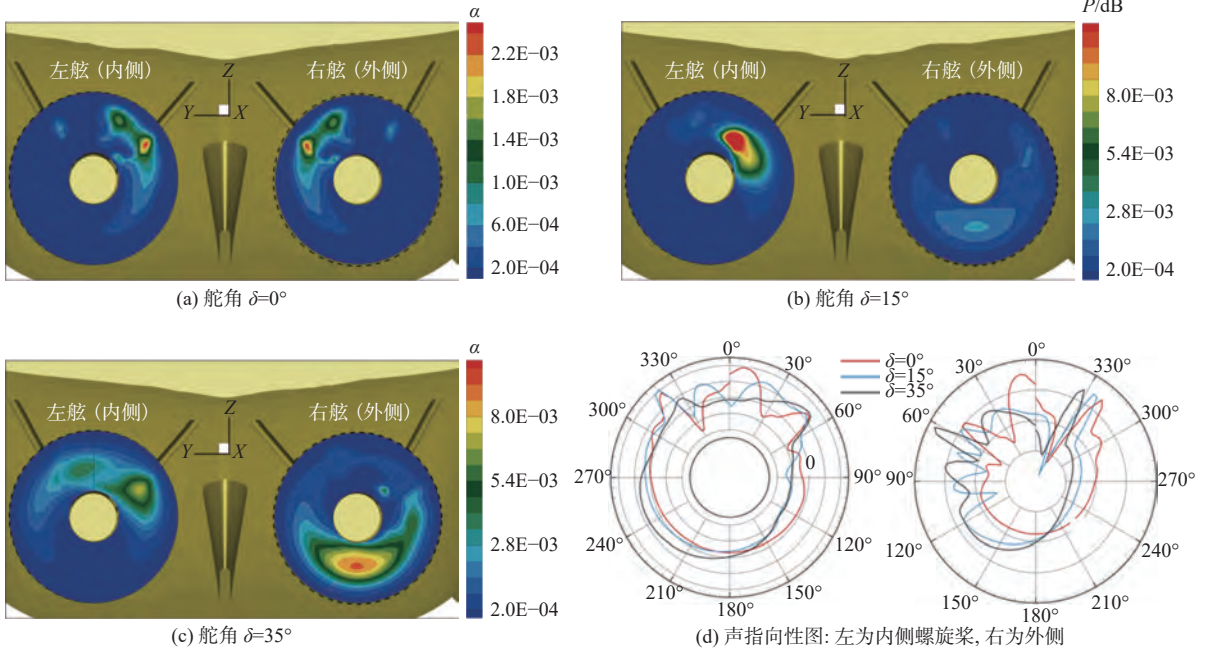


图 8 操纵运动下的螺旋桨空化及声指向性图^[66]

Fig. 8 Cavitation map and sound directivity for propellers during maneuvering^[66]

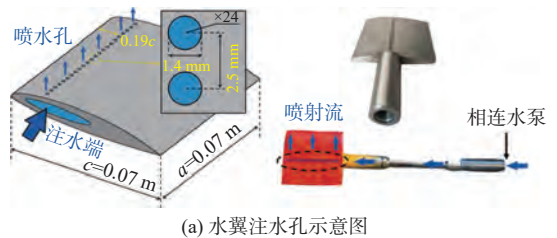
2.6 空化噪声的抑制

对于空化噪声抑制, 可以分为主动控制和被动控制 2 种方法。

主动控制一般是在水翼前缘或螺旋桨叶尖喷水或注水。研究发现, 在水翼前缘设置注水口, 能明显改善剧烈的压力波动, 减小偶极子和四极子强度。其原因是注入的水向流场提供了额外的能量, 延迟了边界层分离^[97]。同理, 设置出气孔也能明显改善表面压力脉动, 从而降低空化噪声^[98]。实尺度观测发现, 螺旋桨空化通常最先发生在叶尖处(梢涡空化), 而后噪声水平急剧增加^[99]。通过叶尖注水的方式, 能够显著延迟梢涡空化发生的时间, 从而降低空化噪声^[100]。图 9 所示分别为水翼和螺旋桨主动抑制空化噪声的示意图。

被动控制是指改变水翼或螺旋桨的结构, 从而达到降低空化噪声的目的。高度侧斜的螺旋桨一般空化噪声较低^[101]。Ku 等^[102]对 SUBOFF 潜艇螺旋桨空化噪声进行了研究, 证实了大侧斜螺旋桨能够降低空化噪声。通过在水翼上设置小栅活着开槽, 即可降低空化噪声^[103]。Dang 等^[104]在水翼展向上开微型小槽, 发现能够降低高频噪声。Huang 等^[105-106]发现 C 型槽和 T 型槽都可以较好地

减小水翼空化噪声。此外, 将水翼后缘设计成锯齿状结构, 也能够有效减小空化噪声^[107]。该类锯齿状结构用在螺旋桨叶导边上同样奏效^[108]。还有研究发现, 提高螺旋桨表面粗糙度能够减小空泡体积和空化噪声, 尽管这会牺牲一部分推进效率^[109]。表面粗糙度对空化噪声的影响机理还不明确, 目前主要认为其影响边界层的发展。



(a) 水翼注水孔示意图



(b) 螺旋桨叶梢开孔示意图

图 9 水翼、螺旋桨注水抑制空化噪声装置^[97, 100]

Fig. 9 Sketch of the water injection for hydrofoil and propeller to suppress cavitation noise^[97, 100]

3 水气泡混合流噪声计算应用

实海况下的船海结构物与周围海水强烈相互作用,形成复杂的水气泡混合流。水气泡混合流的形成原因可以归纳为2个:船艏破波引起的液滴飞溅和气体卷吸^[110]、船艉螺旋桨引起的水汽强相互作用尾迹^[111]。已有一些研究对水气泡混合流进行数值模拟^[112]。

水气泡混合流的一个重要特点是其中包含大量的气泡和液滴,已有很多精细化研究证明了气泡、液滴会对噪声产生影响^[113-114]。气泡脉动会形成新的声源^[115],由于存在大量的微小气泡,与空泡噪声源不同的是,水气泡混合流中的气泡声源一般采用模式化方法简化计算。气泡群的存在会对噪声传播产生吸收作用^[116-117],自由面会对声波有反射作用并对声阻尼产生影响。本章将分别从气泡、自由面液滴的角度总结水气泡混合流对噪声的影响,并给出实测噪声的例子。

3.1 水气泡混合流噪声计算方法

水气泡混合流噪声的声源可以归纳为3类:第1类是单个气泡或单对气泡产生的噪声,在分裂或融合时,应用简化模型计算;第2类是由于气泡群的存在,气泡噪声相互影响,但这类噪声的处理方法一般就是各个气泡声源线性叠加;第3类是气泡存在对流场的影响,从而影响原有的水下噪声声源。此外,还需考虑噪声衰减效应。

首先,介绍单个气泡分裂噪声计算模型(Deane-Czerski模型)^[118]。实验表明,噪声集中表现在气泡初生的一小段时间内。这可以认为是气泡分裂过程导致的,因为气泡分裂是新气泡产生的一个重要来源。

按照单个气泡的Rayleigh-Plesset方程(如式(3)),在等号右边添加源项,模拟气泡的变形和振荡过程。源项作为强迫力,可根据实验获得的压力 p ,按照牛顿第二定律,依次获得二阶导数项、一阶导数项和零阶导数项的系数,从而完成拟合。所以,得到了气泡的运动方程,也就得到了压力分布规律,即噪声分布规律。

接下来介绍如何将简化的单个气泡噪声模型应用到破波中的气泡群中。数值方法上,类似流声类比思想,采用近场声源结合远场格林函数积分的方式获得^[25]。数值算法上,需要对含气部分进行体积分。因此,这里要解决3个核心问题:气泡生成率、单个气泡的脉动以及格林函数的表达式^[119]。

气泡生成率可以通过实验拟合得到的经验公

式获得,一般认为大于Hinze尺度的气泡,按照 $-10/3$ 次幂规律分布;小于Hinze尺度的气泡,按照 $-3/2$ 次幂规律分布。单个气泡的压力脉动可以按照简单的正弦波辐射线性叠加得到,其中的振荡幅值根据Deane-Czerski模型计算获得。格林函数的表达式需要考虑气泡群衰减吸收效应,一般按照指数衰减规律进行预测,并且不同频率成分的衰减程度也有所不同。

这类半经验公式方法的可行性和有效性已经通过剪切流下单个气泡噪声实验^[118]、不同波陡工况下噪声实验^[119]等得到验证。水气泡混合流噪声计算流程如图10所示。

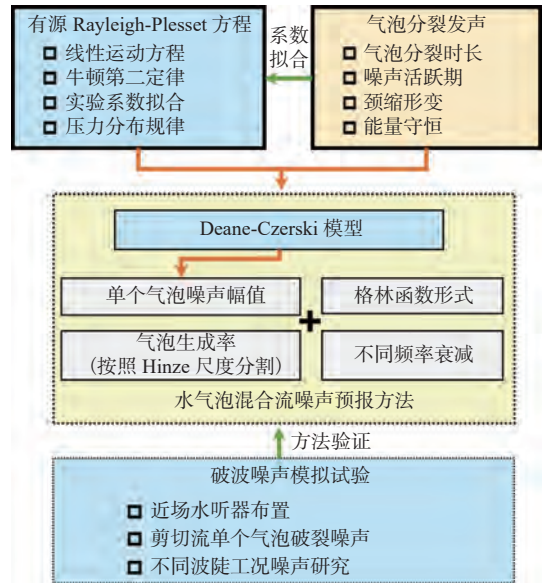


图10 水气泡混合流噪声计算方法思路和流程

Fig. 10 Computational method and workflow for water-air-bubble mixed flow noise

3.2 微小气泡群对噪声的影响

水气泡混合流中微小气泡的分裂、聚并等行为会对流场脉动造成影响,形成新的声源。研究发现,气泡的初生和溃灭过程存在声压变化^[120]。气泡大小、溃灭方向等因素也会对噪声辐射产生影响^[121]。

混合流中气泡声源的构造方法可以分为线性和非线性理论。如果忽略气泡变形,只考虑球状收缩膨胀且作微幅振动,则可以认为是一种单极子源。与空泡声源不同的是,当前研究常将该振荡假设为简谐振荡,且阻尼系数根据经验设定为一个常数^[122]。图11所示为水气泡混合流中的气泡和噪声分布,图中PDF为功率谱密度, ω_c/ω_0 为无量纲化的圆频率。

由此发展形成的线性理论是预测气泡声源的主要方法。实验证明,对于一些简单流动,使用线性方程能够较为准确地预测^[123];但对于复杂流

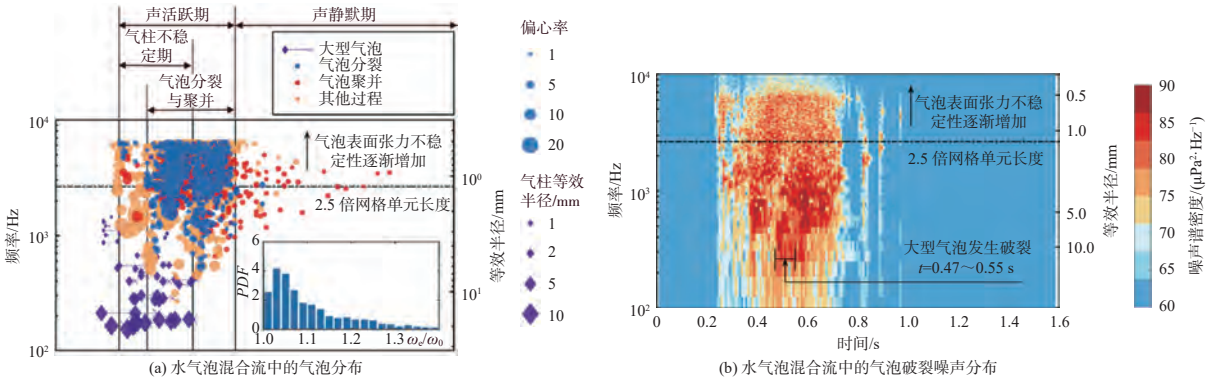


图 11 气泡尺寸分布及对应的峰值频率和声功率^[25]

Fig. 11 Bubble size distribution and corresponding peak frequency and sound power^[25]

动, 非线性声源如四极子, 对水下噪声的影响不容忽视^[124]。

微小气泡群的存在不仅会产生新的声源, 还会对噪声的传播产生影响, 主要体现在声速变化和声功率损失 2 个方面。噪声在水下传播, 穿过气泡时, 会引起气泡的微幅振动, 这种振动会影响声速并造成能量耗散^[113]。此外, 气泡外的压力非均匀性会加剧声波的衰减^[125]。有研究针对掺气流和空化流 2 种两相流噪声传播进行了理论研究, 发现掺混入水的气泡与空化气泡对噪声的影响有很大不同: 对低频声波而言, 掺混入水的气泡相比于空化气泡, 对声速的影响更小, 但对声能的耗散作用更大^[126]。有学者针对低频段水气气泡混合流的噪声传播进行了研究, 通过对声能耗散进行建模, 间接对气泡散射效应进行预测^[127]。

早期研究人员对线性声波穿过水气泡问题进行了深入研究, 并提出了一整套预测方法^[123], 该方法的预测结果已经被一些实验数据证明是可靠的。近些年, 学者们开始关注声波非线性成分受到的影响, 发现在水气混合流中, 非线性声波比线性声波衰减更明显^[128]。此外, 考虑质量转换、气泡聚并等动力学行为, 从而更精确地预测水气混合流环境下的噪声^[14]。

3.3 自由面液滴对噪声的影响

一些研究认为液滴产生的噪声本质上来源于气泡^[114]。当液滴撞击自由面时, 会引起水气界面的波动, 同时在水下生成微小气泡, 该微小气泡受到局部压力的作用会产生振荡, 进而辐射噪声。具体表现为 2 个过程: 一是在液滴飞溅时, 气体被卷入液滴中, 产生微小气泡; 二是液滴落入水中, 强大的冲击使得微小气泡产生振荡, 从而形成辐射噪声, 如图 12 所示^[129]。

除了水下微小气泡会对噪声产生影响外, 自由面的存在也对声波有反射作用并对声阻尼产生

影响^[130]。与空化流不同的是, 自由面附近的噪声主要集中在高频段内, 通常大于 1 kHz。这是因为相比于空泡, 分布于自由面附近的气泡尺度更加微小。

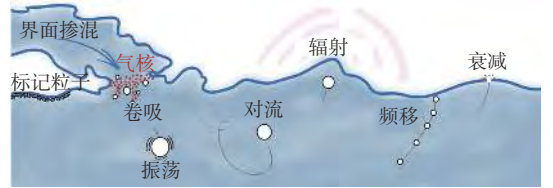


图 12 自由面附近液滴辐射噪声示意图^[129]

Fig. 12 Schematics of droplet radiation noise near free surface^[129]

有学者采用单向耦合的思路计算自由面附近的液滴噪声, 即只考虑流场对声场的影响^[129]。近些年, 通过实验总结出了自由面附近的声阻尼经验公式^[114], 可以简单考虑流场对声阻尼的影响, 但还没有应用于数值预报中。综上, 当前对自由面液滴的考虑还属于比较初级的方式。

3.4 实海况水气混合流噪声

在实海况下, 破波是水气泡混合流形成的一个重要原因^[131]。研究人员提出了许多破波噪声的模型函数, 如 Deane-Czerski 模型^[118], 该模型给出了气泡脉动幅值随时间变化的函数, 借此能够计算破波噪声。对于水气泡混合流中的微小气泡, 研究人员多采用 CLS-VOF 方法捕捉自由面^[132-133], 这种界面捕捉方法能够追踪气泡初生、聚并、破裂的全过程, 可以较为精确地模拟破波现象。数值模拟有时会忽略自由面的反射效应, 因为在破波发生时自由面附近存在微小气泡群(称为声吸收层), 声信号会被这一层气泡吸收。但是这也导致噪声在低频范围内被明显低估^[25]。Deane 等^[133]提出一种破波噪声经验方法, 该方法认为声压级是含气率、声吸收层厚度等的函数。微小气泡聚并过程也是破波噪声的一个重要来源。Czerski^[134]研究了气泡聚并过程中的噪声, 发现气泡聚并的

噪声机理可以归结于气泡体积的迅速增加。由于水气泡混合流中一般都是微小气泡,这类气泡很容易受到声波的影响出现形状变化,甚至破裂。Ma等^[132]发现声波会导致气泡破裂,并且产生射流,射流的方向总是朝向声波方向。这表明在水气泡混合流中需要考虑流声双向耦合。

在海洋环境方面,经测量发现,噪声的能量在破波能量中占比为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-8}$ 之间^[135]。Li等^[136]建立了海上水气泡混合流噪声的高斯经验模型,考虑了风速、船舶主尺度、航速等因素。实船试验方面,美国研究人员^[137]曾对南加州海港过往的商船产生的噪声开展长期统计分析,发现对于大部分船型,噪声分布并不是对称的,船艏附近的声压级比其他区域高 $5 \sim 10$ dB。船艏水气泡混合流噪声是这种不对称分布的一个重要原因。水听器布置如图13所示^[49],图中H1~H6为水听器位置。

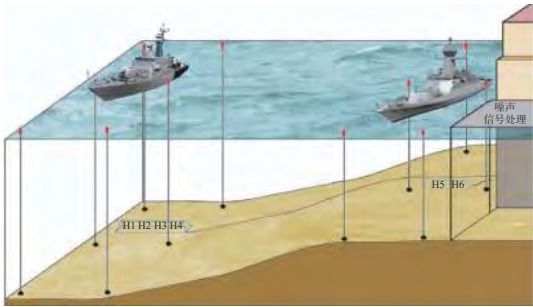


图13 实海况水听器布置示意图^[49]

Fig. 13 Schematics of hydrophones' layout in the real sea state^[49]

4 研究展望

水动力学噪声是船海结构物的重要噪声来源,而含水气界面水动力噪声由于其复杂性,一直是学术界和工程界富有挑战性的问题。未来发展有以下几个重点研究方向:

1) 建立精细的两相流界面模拟方法。自由面、空化以及水气泡混合流均涉及水气两相流问题,能否对其进行准确模拟,直接影响含水气界面水动力噪声的预报精度。为此,需要对传统的界面捕捉方法进行系统研究。同时,开展精细网格方法和高精度格式数值耗散抑制方法研究。为含水气界面水动力噪声模拟提供准确的流场数据支撑。

2) 考虑波浪对水动力噪声的影响。船舶在实海况或高速航行时,会遇到波浪拍击船艏的情况,引发噪声。不仅如此,波浪还会与船艏、船艉处的自由面相互撞击,直接导致辐射噪声。波浪砰击具有强非线性、复杂性、瞬时性等特点,需要深入研究其作用机理与特性,从而分析波浪砰击

诱发的噪声。

3) 建立水气泡混合流噪声预报方法。水气泡混合流的生成与演化的机理复杂,且会与船体周围的分离流和空化流等复杂流动相互作用。当前我国在该领域的研究十分欠缺,亟需开展水气泡混合流与壁面边界层剪切流动、分离流自由剪切流动、空化流相互作用的数值预报方法研究,利用数值手段研究上述复杂流动相互作用诱发的流体脉动特性,及其对噪声辐射的影响。

4) 研究流声耦合多物理场机制。实验已经证实,声波会对流场,尤其是对气泡产生影响。流场和声场在两相流中是相互耦合的。未来,需要结合高精度水气泡混合流求解技术和声学求解方法,建立水-气-声多物理场耦合求解方法。一方面,需要通过流体求解部分研究水-气-泡混合流在船体表面的分布特征及演化规律,获得流场压力脉动、速度脉动,基于这些脉动信息通过声学方程求解预报声信号的传播、折射和反射等复杂现象,并获得全场的声辐射情况。另一方面,需要分析声信号传播与水-气-泡混合流中气泡分布特征及水-气-泡混合流整体分布特征的相互关系,并通过实海况试验进行验证。

5 总结

水动力学噪声已经成为了海洋结构物噪声的重要来源。在实际海洋环境中,经常遇到含水气界面流动的情况。本文针对最常见的水、气两相流动噪声,选取了自由面噪声、空化噪声、水气泡混合流噪声3种典型的含水气界面水动力噪声问题,给出了当前常用的水动力噪声计算方法,针对3类流动噪声问题,总结了当前的研究进展。得出的结论如下:

1) 流场模拟方面,当前自由面捕捉方面已经形成了CLS-VOF等方法,效果较好。在空化流动模拟方面,RANS不能模拟流场脉动的细节,LES方法则计算量偏大,RANS/LES结合是当前空化流动模拟的主流方式。水气泡混合流方面,当前还无法对高雷诺数和复杂几何物面进行模拟,该领域仍有较大的进步空间。

2) 自由面噪声方面,当前对船海结构物的自由面噪声研究大多停留在只考虑自由面对流场的影响上,忽略了对声场的影响。而一些机理性研究虽然考虑了声场反射效应,却未考虑对流场的影响。未来需要更真实地考虑自由面对流场和声场的同时作用。

3) 空化噪声方面,当前空化噪声的计算方法

主要分成线性声压、非线性声压和球状声压3种成分进行计算。其中空泡噪声源一般采用球形声源近似, 非线性声压由于计算量等原因, 很多研究未考虑。当前水翼、螺旋桨空化噪声的抑制手段分为主动控制和被动控制2类, 本质上都是通过抑制空化现象来控制噪声。未来还需要对空化噪声的机理进行更深入研究。

4) 水气泡混合流噪声方面, 一般认为噪声主要来源于众多气泡, 气泡分裂时期是噪声集中发声时期。建立半经验模型, 并考虑微小气泡群和自由面液滴的复杂作用, 通过改写格林函数的形式来考虑衰减等噪声传播过程。当前方法的缺陷是无法考虑气泡形状影响和气泡间的相互作用, 未来需对水气泡混合流噪声机理进行研究, 对计算方法进行改进。

参考文献:

- [1] BADINO A, BORELLI D, GAGGERO T, et al. Normative framework for ship noise: present and situation and future trends[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2012, 60(6): 740–762.
- [2] KAPLAN M B, SOLOMON S. A coming boom in commercial shipping? The potential for rapid growth of noise from commercial ships by 2030[J]. *Marine Policy*, 2016, 73: 119–121.
- [3] 魏以迈. 我国船舶水下噪声研究进展综述 [J]. *上海造船*, 2000(1): 27–32.
WEI Y M. The progress or the researches on the marine underwater noise in China[J]. *Shanghai Shipbuilding*, 2000(1): 27–32 (in Chinese).
- [4] 李环, 刘聪尉, 吴方良, 等. 水动力噪声计算方法综述 [J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(2): 72–89.
LI H, LIU C W, WU F L, et al. A review of the progress for computational methods of hydrodynamic noise[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(2): 72–89 (in Chinese).
- [5] 华宏星, 俞强. 船舶艉部激励耦合振动噪声机理研究进展与展望 [J]. *中国舰船研究*, 2017, 12(4): 6–16.
HUA H X, YU Q. Structural and acoustic response due to excitation from ship stern: overview and suggestions for future research[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(4): 6–16 (in Chinese).
- [6] 张楠, 李亚, 黄苗苗, 等. 艇桨耦合状态螺旋桨水动力与噪声数值预报方法研究 [J]. *船舶力学*, 2021, 25(11): 1439–1451.
ZHANG N, LI Y, HUANG M M, et al. Numerical prediction approach for hydrodynamic force and noise of propeller in submarine propeller interaction condition[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, 25(11): 1439–1451 (in Chinese).
- [7] 王曦晖, 黄桥高, 潘光. 围壳形状对潜艇水动力噪声影响数值研究 [J]. *中国造船*, 2020, 61(增刊2): 262–272.
WANG X H, HUANG Q G, PAN G. Numerical research on influence of fairwater shape on flow-induced noise of submarine[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(Supp 2): 262–272 (in Chinese).
- [8] 许伟伟, 王庆功, 朱孔浩. 水下两相流噪声频谱研究实验装置的开发 [J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(8): 54–56, 114.
XU W W, WANG Q G, ZHU K H. The experimental device for underwater two-phase flow noise spectrum characteristics[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(8): 54–56, 114 (in Chinese).
- [9] KERMAN B R. Sea Surface sound: natural mechanisms of surface generated noise in the ocean[M]. Canada: Springer Science & Business Media, 2012.
- [10] XIE F Z, ZHAO W W, WAN D C. Numerical simulations of liquid-solid flows with free surface by coupling IMPS and DEM[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102771.
- [11] HUANG F L, MENG Q J, CAO L S, et al. Wakes and free surface signatures of a generic submarine in the homogeneous and linearly stratified fluid[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 111062.
- [12] DE JONG C, BOSSCHERS J, HASENPFLUG H, et al. Surface ship underwater radiated flow noise[C]//Proceeding of Underwater Defence Technology Europe. Amsterdam: Springer Science & Business Media, 2005.
- [13] 王春旭, 吴崇建, 陈乐佳, 等. 流致噪声机理及预报方法研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(1): 57–71.
WANG C X, WU C J, CHEN L J, et al. A comprehensive review on the mechanism of flow-induced noise and related prediction methods[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(1): 57–71 (in Chinese).
- [14] FUSTER D, MONTEL F. Mass transfer effects on linear wave propagation in diluted bubbly liquids[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 779: 598–621.
- [15] INOUE O, HATAKEYAMA N. Sound generation by a two-dimensional circular cylinder in a uniform flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 471: 285–314.
- [16] MARSDEN O, BOGEY C, BAILLY C. Direct noise computation of the turbulent flow around a zero-incidence airfoil[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46(4): 874–883.
- [17] LIU J T, WANG W, CHU N, et al. Numerical simulations and experimental validation on passive acoustic emissions during bubble formation[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 130: 34–42.
- [18] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically I. General theory[J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1952, 211(1107): 564–587.
- [19] CURLLE N. The influence of solid boundaries upon

- aerodynamic sound[J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1955, 231(1187): 505–514.
- [20] WILLIAMS J E F, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1969, 264(1151): 321–342.
- [21] GOLDSTEIN M E. Unsteady vortical and entropic distortions of potential flows round arbitrary obstacles[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 89(3): 433–468.
- [22] POWELL A. Theory of vortex sound[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1964, 36(1): 177–195.
- [23] 李亚, 张楠, 熊紫英, 等. 大涡模拟预报螺旋桨辐射噪声的三种声学方法 [J]. *声学技术*, 2017, 36(5): 461–466.
- LI Y, ZHANG N, XIONG Z Y, et al. Numerical simulation of propeller noise based on LES combining three acoustic prediction methods[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(5): 461–466 (in Chinese).
- [24] ZHANG X S, WANG J H, WAN D C. An improved multi-scale two phase method for bubbly flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 133: 103460.
- [25] GAO Q, SHEN L, DEANE G B. A numerical simulation framework for bubbly flow and sound generation in laboratory-scale breaking waves[J]. *JASA Express Letters*, 2021, 1(10): 100801.
- [26] LEE T, IIZUKA H. Sound propagation across the air/water interface by a critically coupled resonant bubble[J]. *Physical Review B*, 2020, 102(10): 104105.
- [27] CIANFERRA M, IANNIELLO S, ARMENIO V. Assessment of methodologies for the solution of the Ffowcs Williams and Hawkings equation using LES of incompressible single-phase flow around a finite-size square cylinder[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 453: 1–24.
- [28] SCAPIN N, COSTA P, BRANDT L. A volume-of-fluid method for interface-resolved simulations of phase-changing two-fluid flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2020, 407: 109251.
- [29] LIU B J, CHENG D, SUN Z C, et al. Experimental and numerical study of regular waves past a submerged breakwater[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(4): 641–653.
- [30] ZHAO X Z, CHEN Y, HUANG Z H, et al. A numerical study of tsunami wave impact and run-up on coastal cliffs using a CIP-based model[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17(5): 641–655.
- [31] 陈松涛, 赵伟文, 万德成, 等. 带自由液面有限长圆柱绕流数值模拟 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(1): 91–98.
- CHEN S T, ZHAO W W, WAN D C, et al. Numerical simulation of flows around a finite-length cylinder with free surface[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(1): 91–98 (in Chinese).
- [32] DENG X, INABA S, XIE B, et al. High fidelity discontinuity-resolving reconstruction for compressible multiphase flows with moving interfaces[J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 371: 945–966.
- [33] GIBOU F, FEDKIW R, OSHER S. A review of level-set methods and some recent applications[J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 353: 82–109.
- [34] KOO B, YANG J M, YEON S M, et al. Reynolds and Froude number effect on the flow past an interface-piercing circular cylinder[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2014, 6(3): 529–561.
- [35] KELLER J, KUMAR P, MAHESH K. Examination of propeller sound production using large eddy simulation[J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(6): 064601.
- [36] BENSOW R E, LIEFVENDAHL M. An acoustic analogy and scale-resolving flow simulation methodology for the prediction of propeller radiated noise[C]//31st Symposium on Naval Hydrodynamics. Monterey, America: Springer Science & Business Media, 2016: 11–16.
- [37] RIENSTRA S W, HIRSCHBERG A. An introduction to acoustics[M]. Holland: Instituut Wiskundige Dienstverlening, 2004, 18: 19.
- [38] AINSLIE M A. Principles of sonar performance modeling[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [39] CIANFERRA M, ARMENIO V. Scaling properties of the Ffowcs-Williams and Hawkings equation for complex acoustic source close to a free surface[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 927: A2.
- [40] GUO W J, LI T Y, ZHU X, et al. Vibration and acoustic radiation of a finite cylindrical shell submerged at finite depth from the free surface[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 393: 338–352.
- [41] LI T Y, MIAO Y Y, YE W B, et al. Far-field sound radiation of a submerged cylindrical shell at finite depth from the free surface[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(3): 1054–1064.
- [42] KELLETT P, TURAN O, INCECIK A. A study of numerical ship underwater noise prediction[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 66: 113–120.
- [43] IANNIELLO S, MUSCARI R, DIMASCIO A. Ship underwater noise assessment by the acoustic analogy, part II: hydroacoustic analysis of a ship scaled model[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2014, 19(1): 52–74.

- [44] GAUL L, BRUNNER D. Numerical simulation of hydroacoustic fluid-ship interaction by fast BEM & FEM coupling[C]//MARINE V: Proceedings of the V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. Spain: CIMNE, 2013: 213–228.
- [45] 李东升, 吕世金, 俞孟萨. 水面舰船水动力辐射噪声工程估算 [C]//水下噪声学术论文选集 (1985-2005). 苏州: 中国造船工程学会, 2005: 83–91.
- LI D S, LV S J, YU M S. Engineering estimation of surface vessel hydrodynamic radiated noise[C]//Selected Papers on Underwater Noise (1985-2005). Suzhou: Chinese Society of Shipbuilding Engineering, 2005: 83–91 (in Chinese).
- [46] BOSSCHERS J. Propeller tip-vortex cavitation and its broadband noise[D]. Holland: University of Twente, 2018.
- [47] 张维俊, 杨琼方. 水面舰船流噪声数值预报研究与应用 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2013, 27(5): 419–424.
- ZHANG W J, YANG Q F. Study on numerical prediction of surface ship flow noise[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 27(5): 419–424 (in Chinese).
- [48] 王诗洋, 韩康, 唐首祺, 等. 基于 LES 和 FW-H 耦合的水面船舶声场研究 [J]. 应用科技, 2018, 45(6): 22–26.
- WANG S Y, HAN K, TANG S Q, et al. Study of the ship acoustic field based on the coupling of LES and FW-H equation[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(6): 22–26 (in Chinese).
- [49] KOZACZKA E, DOMAGALSKI J. Identification of hydroacoustic wave sources of ship in motion[J]. Polish Maritime Research, 2010, 17(4): 64–71.
- [50] GLOZA I. Experimental investigation of underwater noise produced by ships by means of sound intensity method[J]. Acta Physica Polonica A, 2010, 118(1): 58–61.
- [51] KOZACZKA E, DOMAGALSKI J, GLOZA I. Investigation of the underwater noise produced by ships by means of intensity method[J]. Polish Maritime Research, 2010, 17(3): 26–36.
- [52] BRETSCHNEIDER H, BOSSCHERS J, CHOI G H, et al. Specialist committee on hydrodynamic noise[C]//Final Report and Recommendations to the 27th ITTC. Copenhagen: Springer Science & Business Media, 2014: 45.
- [53] DE JONG C A F, BOSSCHERS J, HASENPFUG H. Model scale measurements of surface ship radiated flow noise[C]//NAG-DAGA International Conference on Acoustics. Rotterdam: Springer Science & Business Media, 2009: 5.
- [54] MCKENNA M F, WIGGINS S M, HILDEBRAND J A. Relationship between container ship underwater noise levels and ship design, operational and oceanographic conditions[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1760.
- [55] JEONG S J, HONG S Y, SONG J H, et al. Numerical method to determine the cavitation inception speed of a submarine propeller based on the noise obtained from bubble dynamics[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110464.
- [56] LEIGHTON T. The acoustic bubble[M]. London: Academic Press, 2012.
- [57] 袁常乐, 万德成. 不同几何形状水下远场噪声分析 [C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 厦门: 《水动力学研究与进展》杂志社, 2020: 474–481.
- YUAN C L, WAN D C. Analysis of underwater far-field noise for different geometries[C]//Proceedings of the 31st National Conference on Hydrodynamics (Volume 1). Xiamen: Journal of Research and Progress in Hydrodynamics, 2020: 474–481 (in Chinese).
- [58] 于连杰, 万德成. 基于 Curle 积分计算椭球体水下远场噪声 [C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 厦门: 《水动力学研究与进展》杂志社, 2020: 956–966.
- YU L J, WAN D C. Calculation of underwater far-field noise of ellipsoid based on Curle integral theorem[C]//Proceedings of the 31st National Conference on Hydrodynamics (Volume 1). Xiamen: Journal of Research and Progress in Hydrodynamics, 2020: 956–966 (in Chinese).
- [59] 袁常乐, 万德成. 不同雷诺数下圆柱流噪声分析 [J]. 中国造船, 2020, 61(增刊 2): 75–82.
- YUAN C L, WAN D C. Analysis of underwater radiation noise of cylinder at different reynolds numbers[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(Supp 2): 75–82 (in Chinese).
- [60] FARASSAT F, BRENTNER K S. The acoustic analogy and the prediction of the noise of rotating blades[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1998, 10(1): 155–170.
- [61] CHOI W S, CHOI Y, HONG S Y, et al. Turbulence-induced noise of a submerged cylinder using a permeable FW–H method[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 8(3): 235–242.
- [62] SEZEN S, KINACI O K. Incompressible flow assumption in hydroacoustic predictions of marine propellers [J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 106138.
- [63] IANNIELLO S. The Ffowcs Williams–Hawkings equation for hydroacoustic analysis of rotating blades, part 1: the rotpole[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 797: 345–388.
- [64] BRENNEN C E. Fundamentals of multiphase flow[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

- [65] KIM S, CHEONG C, PARK W G. Numerical investigation into effects of viscous flux vectors on hydrofoil cavitation flow and its radiated flow noise[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(2): 289.
- [66] DUBBIOSO G, MUSCARI R, ORTOLANI F, et al. Numerical analysis of marine propellers low frequency noise during maneuvering[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 102461.
- [67] MITCHELL T M, HAMMITT F G. Asymmetric cavitation bubble collapse[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1973, 95(1): 29–37.
- [68] HSIEH D Y. Variational methods and dynamics of nonspherical bubbles and liquid drops[C]//Proceedings of the 1973 Symposium on Finite-Amplitude Effects in Fluids. Surrey: IPC Science and Tech. Press, 1974.
- [69] LIDTKE A K, HUMPHREY V F, TURNOCK S R. Feasibility study into a computational approach for marine propeller noise and cavitation modelling[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 120: 152–159.
- [70] SEZEN S, ATLAR M, FITZSIMMONS P. Prediction of cavitating propeller underwater radiated noise using RANS & DES-based hybrid method[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2021, 16(Supp 1): 93–105.
- [71] IANNIELLO S. Sheet cavitation noise prediction from a marine propeller[C]//International Congress on Sound and Vibration ICSV. Italy: Springer Science & Business Media, 2015.
- [72] LI Z H, QIAN Z D, JI B. Transient cavitating flow structure and acoustic analysis of a hydrofoil with whalelike wavy leading edge[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 85: 60–88.
- [73] MIGLIANTI F, CIPOLLINI F, ONETO L, et al. Model scale cavitation noise spectra prediction: combining physical knowledge with data science[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 178: 185–203.
- [74] MIGLIANTI L, CIPOLLINI F, ONETO L, et al. Predicting the cavitating marine propeller noise at design stage: a deep learning based approach[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 209: 107481.
- [75] ONETO L, CIPOLLINI F, MIGLIANTI L, et al. Deep learning for cavitating marine propeller noise prediction at design stage[C]//2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Glasgow: IEEE, 2020: 1–10.
- [76] YU L J, WAN D C, CHEN L Y. Numerical study of flow-induced noise around cylinder and Rod-NACA0012 hydrofoil[C]//The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes: OnePetro, 2021.
- [77] ZHAO M S, WAN D C, GAO Y Y. Comparative study of different turbulence models for cavitation flows around NACA0012 hydrofoil[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(7): 742.
- [78] LEROUX J B, ASTOLFI J A, PROFESSOR A, et al. An experimental study of unsteady partial cavitation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(1): 94–101.
- [79] YU A, WANG X C, ZOU Z P, et al. Investigation of cavitation noise in cavitating flows around an NACA0015 hydrofoil[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(18): 3736.
- [80] AHN B K, JEONG S W, KIM J H. Experimental investigation of cavity patterns and noise characteristics [C]//ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Busan: American Society of Mechanical Engineers, 2016: V007T06A100.
- [81] SEO J H, LELE S. Numerical investigation of cloud cavitation and cavitation noise on a hydrofoil section [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation. Ann Arbor: Springer Science & Business Media, 2009.
- [82] YUAN J P, CHEN Y, WANG L Y, et al. Dynamic analysis of cavitation tip vortex of pump-jet propeller based on DES[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 5998.
- [83] SLOTNICK J, KHODADOUST A, ALONSO J, et al. CFD vision 2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences[R]. America: NASA, 2013.
- [84] HE X H, LIU Z L, WANG X Y, et al. Numerical prediction of the hydrofoil noise[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1650: 032027.
- [85] YU A, WANG Y F, TANG Q H, et al. Analysis of dipole noise level characteristics of NACA0015 hydrofoil under different working conditions[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(1): 63–73.
- [86] 赵旻晟, 万德成. 螺旋桨在非均匀流场中的空化模拟[J]. *中国造船*, 2020, 61(增刊 2): 247–253.
- ZHAO M S, WAN D C. Simulation of propeller cavitation in non-uniform flow field[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(Supp 2): 247–253 (in Chinese).
- [87] ZHU W C, GAO H T, SONG Y C. Numerical investigation of propeller noise from tip vortex cavitation[C]//ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim: American Society of Mechanical Engineers, 2017: V07BT06A046.
- [88] NOUGHABI A K, BAYATI M, TADJFAR M. Investigation of cavitation phenomena on noise of underwater propeller[C]//ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Waikoloa: ASME, 2017.
- [89] SEZEN S, BAL S. A computational investigation of noise spectrum due to cavitating and non-cavitating propellers[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the*

- [Maritime Environment](#), 2020, 234(2): 374–387.
- [90] EBRAHIMI A, RAZAGHIAN A H, TOOTIAN A, et al. An experimental investigation of hydrodynamic performance, cavitation, and noise of a normal skew B-series marine propeller in the cavitation tunnel[J]. [Ocean Engineering](#), 2021, 238: 109739.
- [91] JEONG S J, HONG S Y, SONG J H, et al. Establishment of cavitation inception speed judgment criteria by cavitation noise analysis for underwater vehicles[J]. [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment](#), 2021, 235(2): 546–557.
- [92] PARK C, DO KIM G, YIM G T, et al. A validation study of the model test method for propeller cavitation noise prediction[J]. [Ocean Engineering](#), 2020, 213: 107655.
- [93] SEZEN S, ATLAR M, FITZSIMMONS P, et al. Numerical cavitation noise prediction of a benchmark research vessel propeller[J]. [Ocean Engineering](#), 2020, 211: 107549.
- [94] JEONG H, LEE J H, KIM Y H, et al. Estimation of the noise source level of a commercial ship using onboard pressure sensors[J]. [Applied Sciences](#), 2021, 11(3): 1243.
- [95] BOSSCHERS J. A semi-empirical prediction method for broadband hull-pressure fluctuations and underwater radiated noise by propeller tip vortex cavitation[J]. [Journal of Marine Science and Engineering](#), 2018, 6(2): 49.
- [96] SAKAMOTO N, KAMIIRISA H. Prediction of near field propeller cavitation noise by viscous CFD with semi-empirical approach and its validation in model and full scale[J]. [Ocean Engineering](#), 2018, 168: 41–59.
- [97] WANG W, LI Z J, LIU M Y, et al. Influence of water injection on broadband noise and hydrodynamic performance for a NACA66 (MOD) hydrofoil under cloud cavitation condition[J]. [Applied Ocean Research](#), 2021, 115: 102858.
- [98] SUN T Z, WANG Z H, ZOU L, et al. Numerical investigation of positive effects of ventilated cavitation around a NACA66 hydrofoil[J]. [Ocean Engineering](#), 2020, 197: 106831.
- [99] LEE C S, AHN B K, HAN J M, et al. Propeller tip vortex cavitation control and induced noise suppression by water injection[J]. [Journal of Marine Science and Technology](#), 2018, 23(3): 453–463.
- [100] AKTAS B, YILMAZ N, ATLAR M, et al. Suppression of tip vortex cavitation noise of propellers using PressurePores™ technology[J]. [Journal of Marine Science and Engineering](#), 2020, 8(3): 158.
- [101] ASNAGHIA, SVENNBERG U, BENSOW R E. Numerical and experimental analysis of cavitation inception behaviour for high-skewed low-noise propellers[J]. [Applied Ocean Research](#), 2018, 79: 197–214.
- [102] KU G, CHO J, CHEONG C, et al. Numerical investigation of tip-vortex cavitation noise of submarine propellers using hybrid computational hydro-acoustic approach[J]. [Ocean Engineering](#), 2021, 238: 109693.
- [103] LIU C, YAN Q D, WOOD H G. Numerical investigation of passive cavitation control using a slot on a three-dimensional hydrofoil[J]. [International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow](#), 2020, 30(7): 3585–3605.
- [104] DANG Z G, MAO Z Y, TIAN W L. Reduction of hydrodynamic noise of 3D hydrofoil with spanwise microgrooved surfaces inspired by sharkskin[J]. [Journal of Marine Science and Engineering](#), 2019, 7(5): 136.
- [105] HUANG Z W, HAN Y D, TAN L, et al. Influence of T-shape tip clearance on energy performance and broadband noise for a NACA0009 hydrofoil[J]. [Energies](#), 2019, 12(21): 4066.
- [106] HUANG Z W, HUANG Z Y, FAN H G. Influence of C groove on energy performance and noise source of a NACA0009 hydrofoil with tip clearance[J]. [Renewable Energy](#), 2020, 159: 726–735.
- [107] LEÓN C A, RAGNI D, PRÖBSTING S, et al. Flow topology and acoustic emissions of trailing edge serrations at incidence[J]. [Experiments in Fluids](#), 2016, 57(5): 91.
- [108] 姜慧. 新型仿生螺旋桨水动力性能及噪声性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- JIANG H. Research on hydrodynamic and noise performance of bionic propeller[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016 (in Chinese).
- [109] SEZEN S, UZUN D, OZYURT R, et al. Effect of biofouling roughness on a marine propeller's performance including cavitation and underwater radiated noise (URN)[J]. [Applied Ocean Research](#), 2021, 107: 102491.
- [110] JOHANSEN J P, CASTRO A M, CARRICA P M. Full-scale two-phase flow measurements on Athena research vessel[J]. [International Journal of Multiphase Flow](#), 2010, 36(9): 720–737.
- [111] 张宇, 袁震宇, 王华. 船舶尾迹与尾迹气泡光学遥感研究 [J]. [海洋技术](#), 2010, 29(3): 82–86.
- ZHANG Y, YUAN Z Y, WANG H. Study of optical remote sensing of ship wakes and wake bubbles[J]. [Ocean Technology](#), 2010, 29(3): 82–86 (in Chinese).
- [112] ZHANG X S, WANG J H, WAN D C. Euler – Lagrange study of bubble breakup and coalescence in a turbulent boundary layer for bubble drag reduction[J]. [Physics of Fluids](#), 2021, 33(3): 037105.
- [113] XU X X, GONG J. A united model for predicting pressure wave speeds in oil and gas two-phase pipe-

- flows[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, 60(3-4): 150-160.
- [114] PUMPHREY H C, CRUM L A. Free oscillations of near - surface bubbles as a source of the underwater noise of rain[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, 87(1): 142-148.
- [115] BIE H Y, YE J J, HAO Z R. Effect of nozzle geometry on characteristics of submerged gas jet and bubble noise[J]. *Journal of Laboratory Automation*, 2016, 21(5): 652-659.
- [116] RUSTEMEIER J, GRIEBMANN T, ROLFES R. Underwater sound mitigation of bubble curtains with different bubble size distributions[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2012, 17(1): 070055.
- [117] BOHNE T, GRIEBMANN T, ROLFES R. Modeling the noise mitigation of a bubble curtain[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(4): 2212-2223.
- [118] DEANE G B, STOKES M D. The acoustic excitation of air bubbles fragmenting in sheared flow[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(6): 3450-3463.
- [119] DEANE G B, STOKES M D. Model calculations of the underwater noise of breaking waves and comparison with experiment[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 127(6): 3394-3410.
- [120] SONG J H, JOHANSEN K, PRENTICE P. An analysis of the acoustic cavitation noise spectrum: The role of periodic shock waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 140(4): 2494-2505.
- [121] XU W L, LI J B, LUO J, et al. Effect of a single air bubble on the collapse direction and collapse noise of a cavitation bubble[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 120: 110218.
- [122] FUSTER D, CONOIR J M, COLONIUS T. Effect of direct bubble-bubble interactions on linear-wave propagation in bubbly liquids[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(6): 063010.
- [123] COMMANDER K W, PROSPERETTI A. Linear pressure waves in bubbly liquids: comparison between theory and experiments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 85(2): 732-746.
- [124] CIANFERRA M, PETRONIO A, ARMENIO V. Non-linear noise from a ship propeller in open sea condition[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 191: 106474.
- [125] ZHANG Y N, DU X Z. Influences of non-uniform pressure field outside bubbles on the propagation of acoustic waves in dilute bubbly liquids[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 26: 119-127.
- [126] ZHANG Y N, GUO Z Y, GAO Y H, et al. Acoustic wave propagation in bubbly flow with gas, vapor or their mixtures[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 40-45.
- [127] MARTINS J C, SELEGHIM JR P. Propagation and attenuation of pressure waves in dispersed two-phase flows[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2017, 139(1): 011304.
- [128] LOUISNARD O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid, part I: theory, non-linear attenuation and traveling wave generation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(1): 56-65.
- [129] ZHENG C X, JAMES D L. Harmonic fluids[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 37.
- [130] LI Q, LIU S, SHANG D J. Prediction of acoustic energy radiated by bubble produced by raindrops[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 4581937.
- [131] WU D K, WANG J H, WAN D C. Delayed detached eddy simulation method for breaking bow waves of a surface combatant model with different trim angle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 242: 110177.
- [132] MA X J, HUANG B, LI Y K, et al. Numerical simulation of single bubble dynamics under acoustic traveling waves[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 619-630.
- [133] DEANE G B, CZERSKI H. A mechanism stimulating sound production from air bubbles released from a nozzle[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(6): EL126-EL132.
- [134] CZERSKI H. A candidate mechanism for exciting sound during bubble coalescence[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129(3): EL83-EL88.
- [135] KLUSEK Z, LISIMENKA A. Acoustic noise generation under plunging breaking waves[J]. *Oceanologia*, 2013, 55(4): 809-836.
- [136] LI J H, WHITE P R, BULL J M, et al. A noise impact assessment model for passive acoustic measurements of seabed gas fluxes[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 183: 294-304.
- [137] MCKENNA M F, ROSS D, WIGGINS S M, et al. Underwater radiated noise from modern commercial ships[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(1): 92-103.